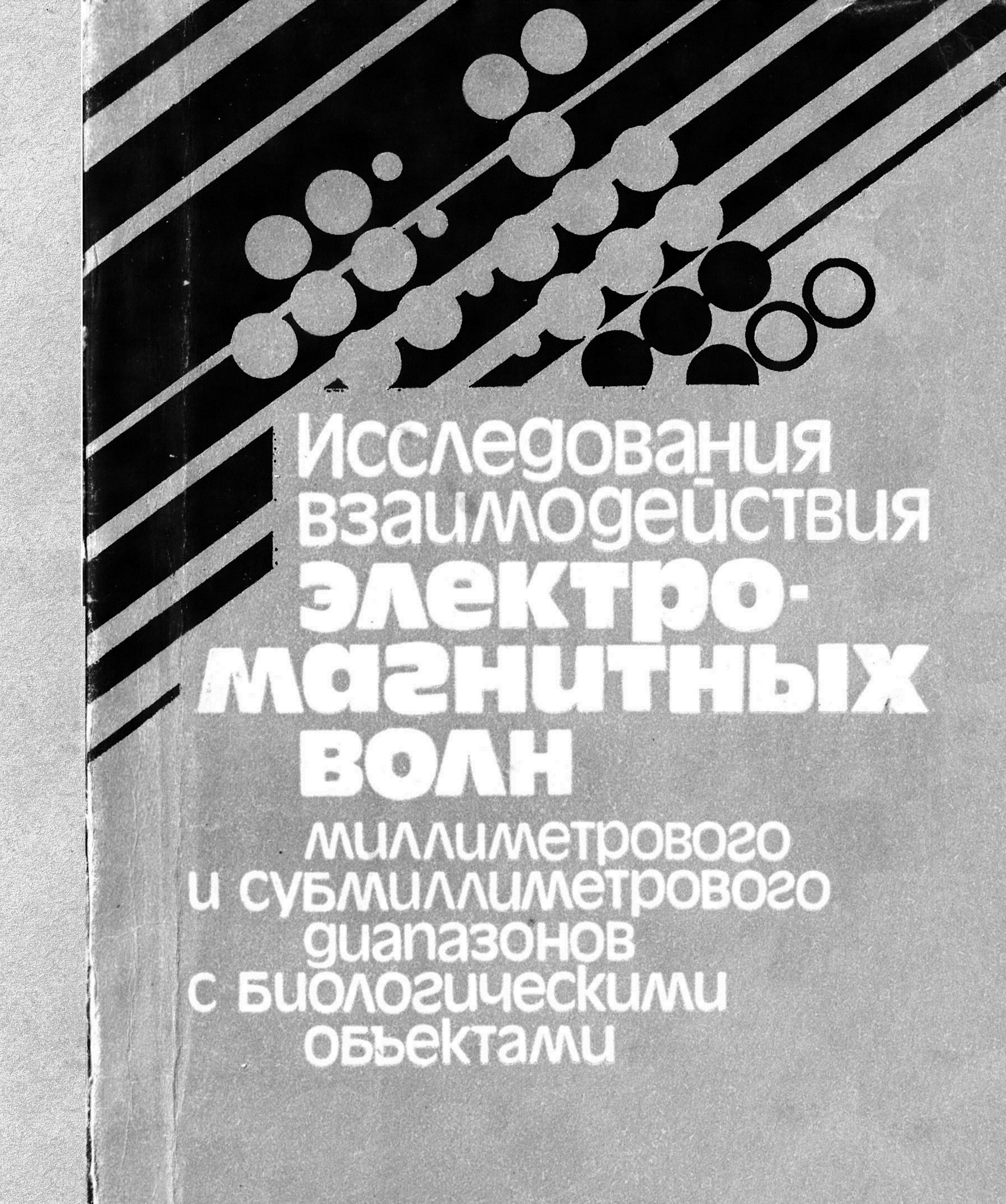

Исследования
взаимодействия
электро-
магнитных
волн
миллиметрового
и субмиллиметрового
диапазонов
с биологическими
объектами

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
Научный совет по проблеме "Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн"
Институт радиофизики и электроники

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Сборник научных трудов

Киев Наукова думка 1989

УДК 577:537.868.029.25(06)

Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; Редкол.: Шестопалов В.П. (отв.ред.) и др.- Киев: Наук. думка, 1989.- 152 с.- ISBN 5-12-000864-X.

В сборнике приведены результаты исследований взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами. Рассмотрены как фундаментальные задачи, связанные с изучением общих физических закономерностей, так и вопросы использования электромагнитного излучения в медицине и сельском хозяйстве.

Для научных работников и инженеров, работающих в области радиофизики, электроники, биофизики, биологии, медицины.

Утверждено к печати ученым советом
Института радиофизики и электроники АН УССР

Редакция физико-математической литературы

Редактор В.М.Чирков

Научное издание

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ
С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Сборник научных трудов

Художник обложки М.Э.Кропивницкая
Художественный редактор И.Е.Писарева
Технический редактор С.С.Хаща
Оператор А.С.Серикова
Корректоры Л.Н.Вальнева, О.В.Собкевич

ИБ № 9970

Сдано в набор 20.05.89. Подп. в печ. 24.10.89. БФ 02604. Формат 60x84/16. Бум. офс. № 1. Офс. печ. Усл. печ. л. 8,96. Усл. кр.-отт. 9,19. Уч.-изд. л. 9,59 + вкл. 0,11 = 9,70. Тираж 700 экз. Заказ 9-285. Цена 1 р. 90 к.

Оригинал-макет подготовлен в издательстве "Наукова думка".
252601 Киев 4, ул. Репина, 3.
Киевская книжная типография научной книги. 252004 Киев 4, ул. Репина, 4.

И $\frac{2302020100-586}{M221(04)-89}$ 416-89

ISBN 5-12-000864-X

УДК 621.3.029.65:577.3.2

В.Я.Малеев, В.А.Кашпур

О МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕХАНИЗМАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С БЕЛКАМИ И ДНК. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал о воздействии электромагнитного излучения миллиметровых волн на биологические объекты разного уровня организации - от макромолекул до целостного организма [1-3]. Некоторые обнаруженные эффекты уже применяются в медицинской практике. Наиболее интригующим моментом в этих экспериментах является обнаружение чрезвычайно острых резонансных эффектов воздействия электромагнитного излучения на биологические объекты. Выяснение молекулярной природы указанных резонансных эффектов - весьма важная задача.

В данной статье приведен краткий обзор современного состояния проблемы применительно к важнейшим типам биологических макромолекул - белкам и ДНК. Обсуждены литературные и оригинальные данные, относящиеся к теоретическому и экспериментальному изучению колебательных состояний этих биополимеров в интервале частот, включающем сантиметровые (см), миллиметровые (мм) и субмиллиметровые (субмм) волны.

Теоретические модели колебаний белков. В случае глобулярных белков рассматриваются механизмы, которые предполагают коллективные движения всей макромолекулы или отдельных ее крупных частей - субъединиц, доменов и т.п. При расчете нормальных колебаний на основе данных рентгеноструктурного анализа на уровне атомного разрешения выбирают исходные координаты в конформационном пространстве макромолекул и используют различные приближения для выделения из полной матрицы силовых констант части, ответственной за наиболее низкочастотные моды с учетом возможных нелинейных эффек-

тов. Из теоретических работ такого плана отметим несколько исследований, выполненных в последние годы.

В работе Гё и др.[4] рассчитаны низкочастотные моды колебаний для небольшого глобулярного белка - ингибитора бычьего панкреатического трипсина. Частоты колебаний ниже 120 см$^{-1}$ отвечают модели упругих колебаний белковой молекулы, моды с частотами ниже 50 см$^{-1}$ (λ > 0,2 мм) соответствуют ангармоническим колебательным движениям.

Чоу развита квазинепрерывная модель [5], которая предполагает, что доминантный низкочастотный мод в молекуле белка определяется коллективными флуктуациями слабых связей, в частности водородных, и внутренним смешением массивных атомов. На основе этой модели рассчитаны низкочастотные движения в α- и β-структурах белков. Показано, что движения типа "гармошки" в β-слое и дыхательные движения β-"баррелей" (бочкообразная структура) на примере иммуноглобулина С и конканавалина А отвечают низкочастотным модам при 20–30 см$^{-1}$ (λ = 0,5–0,3 мм).

В работе Леви и др. [6] применен квазигармонический метод расчета нормальных колебаний, в котором эффективные силовые постоянные получают вычислением в рамках молекулярной динамики средних квадратичных изменений внутренних виртуальных координат с учетом ангармонических эффектов. Рассмотрен уже упомянутый белок - ингибитор панкреатического трипсина, в котором в качестве центров взаимодействия взяты аминокислотные остатки. Наивысшая частота из 168 рассчитанных нормальных колебаний соответствует 250 см$^{-1}$, наинизшая - 0,32 см$^{-1}$ (λ = 3 см), тем самым предсказано много колебаний, попадающих в интересующий диапазон.

В статье Брукса и Карплуса [7] использован итерационный метод, позволяющий извлечь собственные векторы из полной матрицы вторых производных потенциальной энергии системы. С помощью указанного метода рассмотрено междоменное движение в лизоциме (шарнирно-изгибный мод) с частотой 3,6 см$^{-1}$ (λ = 2,8 мм).

Теоретические модели колебаний ДНК. В случае ДНК теория также предсказывает возможность существования колебаний, проявляющихся в диапазоне КВЧ. Свыше 20 лет назад нами была рассмотрена модель связанных крутильных колебаний азотистых оснований в ДНК [8]. По оценке частотного диапазона, в котором могут проявиться эти колебания, получены значения порядка 10–100 см$^{-1}$, т.е. λ = = 1–0,1 мм.

В последнее время низкочастотные колебательные состояния ДНК изучены в серии работ Проховского и соавторов [9–12]. Они развивают "твердотельные" представления применительно к двойной спирали

ДНК, в которой, по предположению, имеются дальние коллективные взаимодействия. Рассмотрены решеточные моды в фононном спектре ДНК с использованием модели валентного и дальнего электростатического силового поля. На основе этих моделей рассчитаны частоты (20,3; 25 и 27 см$^{-1}$) модов, активных в спектре комбинационного рассеяния [9].

Другая модель предполагает наличие акустических волн в двойной спирали - продольных и поперечных. Частоты этих колебаний определяются упругими свойствами ДНК и зависят от длины цепи ДНК, изменяя которую, можно перекрыть широкий диапазон, охватывающий субмм, мм и см волны.

Предсказаны также локальные колебания типа "резонанса на дефектах" структуры ДНК (концевые дефекты и дефекты типа "вилки") [11]. Эти колебания предположительно обнаружены экспериментально на низких частотах ~ 600 МГц [13].

Отметим также модель конформационной подвижности ДНК, предложенную С.Н.Волковым и А.М.Косевичем [14], в которой рассматриваются "маятниковые" движения нуклеозидов. Частоты колебаний, определенные в этой модели (10 и 60 см$^{-1}$), отвечают субмм волнам.

Из перечисленных результатов видно, что как в белках, так и в ДНК теория предсказывает существование низкочастотных колебаний, проявляющихся в интересующем нас диапазоне.

Экспериментальная ситуация. Спектры "сухих" биополимеров. Трудности экспериментального наблюдения предсказываемых теоретически колебательных состояний белков и ДНК в КВЧ-диапазоне связаны: 1) с отсутствием достаточно чувствительной спектральной аппаратуры в диапазоне между ИК- и СВЧ-областями; 2) с наличием очень сильного поглощения воды в этом диапазоне. Теоретические модели, о которых шла речь выше, не учитывают, как правило, взаимодействия с водным растворителем. Учет этого взаимодействия на простейших моделях упругих колебаний биополимеров в вязкой среде приводит к сдвигу резонансных частот и "расплыванию" спектров в широкие полосы [10, 15]. В этой связи следует отметить недавнюю работу Ван Зандта [16], в которой предлагается возможная теоретическая интерпретация резонансного поглощения микроволнового излучения растворами плазмидной ДНК, обнаруженного Эдвардсом и др. [17]. В основу модели положено предположение о том, что гидратная оболочка ДНК представляет собой слоистую структуру и взаимодействие первого слоя воды с ДНК происходит без диссипации энергии.

В большинстве экспериментов по обнаружению колебательных состояний используются образцы либо вообще не содержащие воды, либо слегка увлажненные.

Наиболее определенная картина наблюдается в спектрах комбинационного рассеяния сухих образцов белков и увлажненных образцов ДНК [18-21]. В случае глобулярных белков обнаруживаются низкочастотные моды вблизи 20-30 $см^{-1}$, частота которых слабо зависит от размеров и формы белковых глобул [18].

Интересны результаты, полученные для ДНК на образцах, содержащих разное количество воды. По данным Урабе и др. [20, 21], в спектре комбинационного рассеяния для А-формы ДНК наблюдаются полосы при 85 и 21 $см^{-1}$. С увеличением содержания воды в образце низкочастотной мод сдвигается в сторону низких частот к 14 $см^{-1}$ для В-формы ("смягчается") и исчезает при дальнейшем добавлении воды. Эта особенность позволила отнести указанный мод к межспиральному колебательному движению.

В мм диапазоне имеется мало данных о возможных колебательных состояниях белков и ДНК. Можно лишь отметить работы Гензела, Кремера и др. [22, 23], в которых измерена диэлектрическая проницаемость сухих образцов белков на примере гемоглобина, лизоцима и полипептида - полиаланина в широком интервале частот 10-1000 ГГц с помощью техники сверхразмерного резонатора и при разных температурах (от комнатной до гелиевой). Никаких полос поглощения в исследованных образцах авторы не обнаружили. Коэффициент поглощения монотонно возрастает с частотой по закону 3/2, а дисперсия $\varepsilon(\omega)$ может быть объяснена наличием трех дебаевских релаксационных процессов, заключающихся в релаксации атома водорода в двухъямном потенциальном ящике, моделирующем водородную связь $NH...OC$.

В связи с обсуждаемой проблемой следует выделить уникальные результаты, полученные Н.П.Диденко с соавторами [24]. Используя метод ядерной гамма-резонансной спектроскопии для регистрации изменений конформации белка - лиофильно высушенного гемоглобина, меченого ^{57}Fe, под воздействием электромагнитного излучения в диапазоне 40-50 ГГЦ, авторы обнаружили чрезвычайно узкие пики воздействия ($\Delta f/f \sim 10^{-4}$). Учитывая принципиальное значение этих данных, на наш взгляд, следует провести тщательный и всесторонний анализ условий проведения указанных экспериментов.

Экспериментальные исследования растворов биополимеров. Поскольку большинство моделей, предсказывающих наличие колебательных состояний в биополимерах, учитывает их динамические свойства и конформационную подвижность, т.е. неявно предполагает взаимодействие с растворителем, важны экспериментальные исследования диэлектрических свойств биополимеров при наличии большого количества воды, что реализуется в растворах.

По нашим многочисленным данным о диэлектрических характеристиках растворов многих белков и нуклеиновых кислот, в диапазоне 6-8 мм не обнаруживается избыточное поглощение, которое можно было бы приписать растворенным макромолекулам. Напротив, наблюдается декремент диэлектрической проницаемости, объясняемый гидратацией этих биополимеров и позволяющий тем самым изучать этот эффект изменения состояния воды в растворах [25-27].

В связи с этим безусловный интерес вызывают результаты, полученные Свайкордом и др., о наличии большого избыточного поглощения электромагнитного излучения см диапазона водными растворами ДНК [28, 29]. Согласно этим данным, в диапазоне 8-12 ГГц молекулы ДНК из *E.coli* поглощают электромагнитное излучение значительно сильнее, чем вода (в 25 раз больше на частоте 8 ГГц [28]). Исследуя этот эффект повторно более точным диэлектрометрическим методом [29], авторы не нашли заметного поглощения ДНК. Однако в процессе инкубации раствора ДНК с ферментом ДНКазой наблюдали интенсивное дополнительное поглощение во всем диапазоне 9-12 ГГц (в 400 раз больше, чем у эквивалентного количества воды!). Наблюдаемые эффекты были объяснены с помощью модели акустических волн во фрагментах ДНК соответствующей длины [10]. Этой же группой исследователей было также обнаружено резонансное поглощение большой интенсивности в диапазоне частот 2-10 ГГц водных растворов плазмидной ДНК, молекулы которой имеют строго определенную длину [17].

Мы предприняли специальное изучение микроволнового поглощения ДНК в условиях, подобных тем, которые описаны авторами указанных работ. Методом переменной толщины, обеспечивающим точность измерения не хуже 1 %, в диапазоне частот 9-12 ГГц изучено поглощение водных растворов ДНК из эритроцитов цыплят и из *E.coli*, нативных и фрагментированных ультразвуком и ДНКазой [30]. Фрагменты ДНК были проанализированы с помощью гель-электрофореза на 1 %-ном горизонтальном агарозном геле. Показано, что при расщеплении ДНК из E.coli ДНКазой в течение 50 с свыше 50 % ДНК присутствует в виде фрагментов с длинами от 800 до 2800 пар нуклеотидов (пн), а 25 % материала - с длинами от 2800 до 5100 пн. При ультразвуковой обработке основная часть фрагментов имеет среднюю длину около 500 пн, хотя примерно 20 % ДНК представлено в виде фрагментов с длинами от 800 до 2600 пн. Следовательно, в изученных образцах имеется достаточное количество фрагментов ДНК с длинами несколько тысяч пар нуклеотидов, для которых, согласно [29, 17], можно было бы ожидать увеличенное поглощение электромагнитного излучения.

Однако во всех исследованных случаях такого избыточного поглощения по сравнению с растворителем мы не наблюдали. Возможно, обнаруженные эффекты частично обусловлены тем, что эталонный раство-

ритель, использованный авторами цитированных работ, не содержал всех компонентов, в частности соли $MgCl_2$, необходимой для действия ДНКазы. Наличие этой соли повышает коэффициент поглощения на 7 %. Не учитывая этого эффекта, можно объяснить полученный результат собственным поглощением ДНК, которое будет превышать поглощение воды в 35 раз (концентрация ДНК 0,2 %).

Мы не проводили экспериментов по изучению микроволнового поглощения растворами плазмидной ДНК в интервале частот 2-10 ГГц. Однако полученные нами результаты об отсутствии избыточного поглощения растворов ДНК на границе этого диапазона свидетельствуют о том, что необходим тщательный анализ экспериментальных условий, в которых авторы работы [17] обнаружили резонансные эффекты.

Заключение. Из краткого обзора известных теоретических и экспериментальных данных видно, что изучение механизмов поглощения электромагнитного излучения миллиметрового и примыкающих к нему диапазонов макромолекулами белков и ДНК представляет важную и актуальную задачу при решении проблемы конформационной динамики биополимеров и проблемы выяснения механизмов воздействия ЭМИ на биологические объекты.

Вместе с тем следует отметить, что хотя теория предсказывает существование различного рода колебаний в белках и ДНК, частоты которых попадают в указанные диапазоны электромагнитных волн,экспериментально такие колебания, как правило, не обнаруживаются.По нашему мнению, для существования острых резонансов в этих биополимерах вообще нет достаточно разумных физических оснований. Относительно "нормальных" резонансных эффектов (с добротностями порядка 10-100) подобная ситуация в принципе возможна, но для надежного обнаружения таких колебаний требуется дальнейшая разработка чувствительных экспериментальных методов, способных выделить нужные эффекты на фоне преобладающего поглощения водой, и развитие теоретических моделей, максимально учитывающих реальные экспериментальные условия.

1. Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под. ред. Н.Д.Девяткова. - М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1983. - 220 с.
2. Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине : Тез. докл. VI Всесоюз. семинара. - М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1986. - 111 с.
3. Coherent exitations in biological systems / Eds. H.Fröhlich, F.Kremer. - Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1983. - 224 p.
4. Go N., Noguti T., Nishikawa T. Dynamics of the little globular protein in the terms of low-frequency vibration modes // Proc. Nat. Acad. Soc. USA. Biol. Sci. - 1983. - 80. - P. 3696-3700.

5. Chou K.-C. Low-frequency motions in the protein molecules // Biophys. J. - 1985. - 48. - P. 289-297.
6. Levy R.M., Srinivasam A.R., Olson W.K. Quasi-harmonic method for studying very low frequency modes in proteins // Biopolymers. - 1984. - 23. - P. 1099-1112.
7. Brooks B., Karplus M. Normal modes for specific motions of macromolecules: Application to the hinge-bending mode of lysozyme // Proc. Nat. Acad. Soc. USA. - 1985. - 82. - P. 4995-4999.
8. Малеев В.Я. Крутильные колебания оснований в нуклеиновой кислоте // Биофизика. - 1965. - 10. - С. 729-734.
9. Prasad Devi K.V., Prohofsky E.W. Low-frequency lattice mode predictions in A-DNA compared to experimental observations and significance for A-to-B conformational change // Biopolymers. - 1984. - 23. - P. 1795-1798.
10. Van Zandt L.L., Kohli M., Prohofsky E.W. Absorption of microwave radiation by DNA double helix in aquo // Ibid. - 1982.- 21. - P. 1465-1468.
11. Dorfman B.H., Van Zandt L.L. Vibration of DNA polymer in viscous solvent // Ibid. - 1983. - 22. - P. 2639-2665.
12. Phonons in the DNA double helix / E.W.Prohofsky, L.L. Van Zandt, M.Kohli et al. // J.Phys.C. - 1981.-42,N 6.-P.560-562.
13. Lindsay S.M., Powell J. Possible observation of a defect resonance in DNA // Biopolymers. - 1983. - 22. - P.2045-2060.
14. Волков С.Н., Косевич А.М. Конформационные колебания двухтяжевой ДНК. - Киев, 1986. - 25 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т теорет. физики; № 86-119 Р).
15. Persson B.N.J. On the nature of low-frequency vibration modes in the globular protein molecules inserted into the water // Chem. Phys. Lett. - 1986. - 127. - P. 428-431.
16. Van Zandt L.L.Why structured water causes sharp absorption by DNA at microwave frequencies // J. Biomol. Str. and Dynamics. - 1987. - 4. - P. 569-582.
17. Resonant microwave absorption of selected DNA molecules / G.S.Edwards, C.C.Davis, J.D.Saffer et al. // Phys. Rev. Lett.- 1984. - 53. - P. 1284-1287.
18. Painter P.C., Mosher L., Rhoads C. Low-frequency modes in the Raman spectra of proteins // Biopolymers. - 1982. - 21.- P. 1469-1472.
19. Painter P.C., Mosher L.E., Rhoads C. Low-frequency modes in the Raman spectrum of DNA // Ibid. - 1981.-20. - P.243-247.
20. Urabe H., Tominaga Y. Low-frequency collective modes of double helix DNA in the Raman spectra // Ibid. - 1982. - 21. - P. 2477-2481.
21. Collective vibrational modes in molecular assembly of DNA and its application to biological systems. Low-frequency Raman spectroscopy / H.Urabe, H.Hayashi, Y.Tominaga et al. // J. Chem. Phys. - 1985. - 82. - P. 531-535.
22. Relaxation processes on a picosecond time scale in hemoglobin and poly(L-alanine) observed by millimeter-wave spectroscopy/ L.Gensel, F.Kremer, A.Poglitsch et al. // Biopolymers. - 1983. - 22. - P. 1715-1729.
23. Kremer F., Poglitsch A., Gensel L. The temperature dependence of the millimeter waves absorption by lysozyme // 7-th Int. Conf. Infrared and Millimetre Waves. - Marseille, 1983. - L 2-2.
24. Диденко Н.П., Зеленцов В.И., Ча В.А. О конформационных изменениях биомолекул при взаимодействии с электромагнитным излучением // Эффекты нетеплового воздействия мм излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М., 1983.-С.63-77.
25. Кашпур В.А., Малеев В.Я., Щеголева Т.Ю. Исследование гидратации глобулярных белков дифференциальным диэлектрометрическим

методом // Молекуляр. биология. - 1976. - 10, № 3.-С.568-575.
26. Малеев В.Я., Кашпур В.А., Щеголева Т.Ю. Диэлектрометрия в миллиметровом диапазоне длин волн как метод исследования взаимодействия биополимеров с водой // Нетепловые эффекты мм излучения / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М., 1981. - С. 26-41.
27. Малеев В.Я., Кашпур В.А. Взаимодействие миллиметровых волн с водными растворами нуклеиновых кислот и их компонентов // Эффекты нетеплового воздействия мм излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М.,1983.-С.163-171.
28. Swicord M.L., Davis C.C. Microwave absorption of DNA in the 8-12 GHz region // Biopolymers. - 1982. - 21. - P. 2453-2460.
29. Chain-length-dependent microwave absorption of DNA / M.L.Swicord, G.S.Edwards, J.L.Sagripanti et al. // Ibid. - 1983. - 22. - P. 2513-2516.
30. О поглощении растворов ДНК в диапазоне 9-12 ГГц / В.Я.Малеев, В.А.Кашпур, Г.М.Глибицкий и др. // Биополимеры и клетка. - 1986. - 2. - С. 35-38.

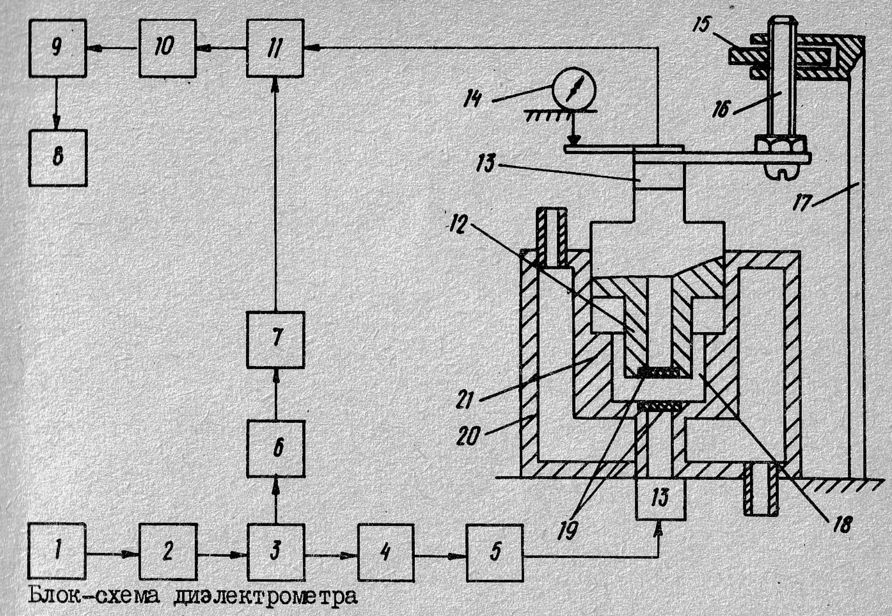
УДК 621.3.029.65:577

Г.М.Глибицкий, В.А.Кашпур

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАСТВОРОВ БИОМАТЕРИАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В настоящее время известен ряд работ, посвященных исследованию диэлектрических свойств биологических веществ в СВЧ диапазоне. Обзор соответствующих данных, выполненный в монографиях [1, 2], позволяет сделать вывод, что одним из наиболее адекватных методов измерения сверхвысокочастотных диэлектрических свойств жидкостей с большими потерями, к числу которых относятся и водные растворы биомолекул, является волноводный метод, основанный на использовании кюветы переменной толщины. Применение этого метода измерения позволило нам ранее изучить водные растворы глобулярных белков и ДНК [3, 4].

СВЧ диэлектрометрия необходима для исследования механизмов биологического воздействия электромагнитного излучения. Однако, поскольку основным веществом, поглощающим волны миллиметрового (мм) диапазона, является вода, изучение диэлектрических свойств в этой области представляет интерес для выяснения роли растворителя как в поддержании нативной структуры биообъектов при различных температурах, так и во влиянии состояния водного окружения на параметры термических конформационных переходов в нуклеиновых кислотах и белках. До сих пор исследования биообъектов в мм области проводились лишь при комнатных температурах. В связи с этим нами разработан СВЧ диэлектрометр, предназначенный для изучения жидкостей с большими потерями (в том числе растворов биообъектов) в диапазоне 6 - 8 мм.



Блок-схема диэлектрометра

В измерительном устройстве (рисунок) сигнал с выхода СВЧ генератора 1, состоящего из блока питания и клистрона, подается через ферритовый вентиль 2 на направленный ответвитель 3, с одного выхода которого часть сигнала (-17 дБ) поступает через аттенюатор 6, упругий волновод 7 на направленный ответвитель 11. С другого выхода направленного ответвителя 3 основная часть сигнала подается через измерительный аттенюатор 4, фазовращатель 5 и волноводный переход с прямоугольного сечения на круглое 13 на вход кюветы 21. Далее сигнал проходит через нижнюю прокладку 19, вклеенную в основание кюветы, исследуемый раствор 18, верхнюю прокладку 19, вклеенную в торец подвижного волновода 12, подвижный волновод, переход с круглого волновода на прямоугольный 13 и поступает на ответвитель 11. Суммарный сигнал с этого ответвителя идет на детектор 10, усилитель 9 и цифровой вольтметр 8.

Переход 13 жестко соединен с микрометрическим винтом 16. Вращением гайки 15, помещенной в оправку стойки 17, осуществляется перемещение волновода 11, которое определяется микрометром 14.

Диэлектрометр пригоден для измерений в широком интервале температур 5-90 °С. Температурный режим задает термостат, в котором в качестве рабочей жидкости могут использоваться вода и другие жидкости. Автоматическая регулировка позволяет поддерживать температуру с точностью 0,1 °С, что контролируется термометром в измерительной кювете.

Для проведения частотных измерений вместо клистронного генератора использовался генератор сигналов высокочастотный Г4-141, имеющий рабочий диапазон 37,5-53,57 ГГц (5,7-8 мм).

Основными измеряемыми величинами служат коэффициент поглощения α и фазовая постоянная β. Толщина слоя жидкости выбирается настолько большой, что возникающие в кювете различного рода отраженные волны полностью поглощаются в веществе и не могут достигать детектора. Поэтому условия согласования при перемещении подвижного волновода не изменяются, а увеличение толщины слоя исследуемой жидкости приводит к ослаблению сигнала в экспоненциальной зависимости и изменению фазы в линейной зависимости от пути сигнала в веществе. Коэффициент поглощения определяется при закрытом канале сравнения измерением продетектированных сигналов J_1 и J_2, соответствующим двум толщинам жидкости X_1 и X_2

$$\alpha = \ln \frac{J_1/J_2}{2(X_2 - X_1)}. \qquad (1)$$

Фазовая постоянная измеряется обычным мостовым методом, т.е. определяются показания фазовращателя φ_1 и φ_2 для соответствующих длин слоя вещества X_1 и X_2 при установлении нулевого баланса на детекторе:

$$\beta = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{X_2 - X_1}. \qquad (2)$$

Зная величины α и β, легко вычислить действительную ε' и мнимую ε'' части комплексной диэлектрической проницаемости для произвольной длины волны

$$\varepsilon' = \lambda/\lambda_{кр} + (\lambda/2\pi)^2(\beta^2 - \alpha^2), \qquad (3)$$

$$\varepsilon'' = 2(\lambda/2\pi)\alpha\beta, \qquad (4)$$

где $\lambda_{кр}$ - критическая длина волны.

С помощью данного диэлектрометра нами в мм диапазоне длин волн проведена серия измерений. В качестве объектов были выбраны вода, для которой основные закономерности поведения диэлектрических параметров достаточно хорошо известны, водный раствор одного из сахаров - сахарозы и водный раствор сывороточного альбумина - вещества, играющего важную биологическую роль.

В табл.1 приведены найденные на длине волны 7,6 мм диэлектрические характеристики воды в температурном интервале 23-80 °С. Приводимые результаты получены нами впервые, однако в ряде работ [5, 6] на основании измерений в более длинноволновой области вычисля-

Т а б л и ц а 1. Термодиэлектрические параметры воды (λ =7,6 мм)

Т, °С	α	β	ε'	ε''	ε_s
23	2,38	4,43	20	31	81
30	2,40	4,77	25	33	80
50	2,27	5,50	37	36	78
60	2,06	5,65	40	34	73
70	1,85	5,67	42	31	67
80	1,68	5,75	44	28	64

Т а б л и ц а 2. Диэлектрические параметры воды (Т = = 20° С)

λ, мм	α	β	ε'	ε''
5,8	2,84	4,87	13	23
6,7	2,40	4,34	15	24
7,2	2,33	4,27	17	26
7,5	2,26	4,18	18	27
8,0	2,10	3,89	17	26

лась величина ε_s, которая может быть сопоставлена с аналогичной величиной, найденной из наших данных. Диэлектрическая проницаемость ε_s является характерным параметром теории Дебая для полярных жидкостей, к которым относятся вода и водные растворы, и представляет собой диэлектрическую проницаемость на частоте, намного меньшей центральной частоты дебаевской дисперсии. Из теории Дебая [7] следует, что

$$\varepsilon_s = \varepsilon' + \frac{(\varepsilon'')^2}{\varepsilon' - \varepsilon_\infty}, \qquad (5)$$

где ε_∞ - диэлектрическая проницаемость воды на частоте, намного большей центральной частоты дебаевской дисперсии. Здесь $\varepsilon_s \approx 5$, а более точные значения в температурном интервале 0-100 °С приведены в работе [6]. Различие между нашими значениями ε_s и известными из литературы [5, 6] не превышает 2-3 %.

Выполненный анализ погрешностей экспериментальных данных включает оценку погрешности, которая обусловлена неполным устранением переотражений в кювете, приводящих к нарушению экспоненциальной зависимости затухания и линейной зависимости фазового сдвига от длины слоя исследуемого вещества. Этот анализ показал, что неточность в определении величин α, β и ε_s не превышает 3 %.

В табл.2 приведена частотная зависимость диэлектрических характеристик, определенная при 20 °С. Видно, что при увеличении длины волны происходит уменьшение коэффициента поглощения и фазовой постоянной. В то же время величины ε' и ε'' монотонно возрастают.

Данные табл.3 описывают диэлектрическое поведение 15 %-ного раствора сахарозы. Общий характер зависимости всех величин от температуры тот же, что и в случае чистой воды и, очевидно, определяется и в случае раствора молекулами воды. Однако и коэффициент поглощения, и фазовая постоянная изменяются значительно медленнее, чем в случае воды. Так, для воды затухание при 80 °С на 30 % мень-

Т а б л и ц а 3. Термодиэлектрические параметры раствора сахарозы (λ = 7,6 мм)

T, °C	α	β	ε'	ε''
30	2,07	4,14	19	25
40	2,07	4,49	23	27
50	2,04	4,72	26	28
60	1,96	4,95	30	28
70	1,79	5,05	33	26
80	1,66	5,20	35	25

Т а б л и ц а 4. Термодиэлектрические параметры раствора сывороточного альбумина (λ=7,6мм)

T, °C	α	β	ε'	ε''
23	1,97	3,95	17	23
30	1,98	4,08	19	24
50	1,92	4,66	26	26
60	1,76	4,83	30	25
65	1,67	4,81	30	23

ше, чем при 30 °C, а для раствора сахарозы - только на 20 %. Появление дополнительного поглощения при нагреве может быть обусловлено как изменением взаимодействия сахарозы с водой, так и проявлением микроволнового поглощения молекулами сахарозы (например, за счет собственного вращения).

Диэлектрические измерения раствора сывороточного альбумина человека (концентрация 15 %) также указывают на монотонное уменьшение поглощения и увеличение фазового сдвига при нагреве. Измерения проведены до температуры 65 °C, поскольку при дальнейшем нагреве происходит денатурация белка, сопровождаемая гелеобразованием и невозможностью вследствие этого воспроизводимым образом перемещать подвижный волновод в образце. Как видно из табл.4, температурная зависимость коэффициента поглощения и фазовой постоянной более слабая для раствора белка, чем для чистой воды. Поэтому следует считать, что при повышении температуры изменяются не только свойства воды, но и характер взаимодействия белка с растворителем.

Итак, предлагаемый диэлектрометрический метод позволяет получать важную информацию о свойствах биологических веществ, проявляющихся в поведении диэлектрических параметров в мм диапазоне длин волн.

1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. - М.: Физматгиз, 1963. - 404 с.
2. Grant E.H., Sheppard R.J., South G.P. Dielectric behaviour of biological molecules in solution. - Oxford: Clarendon press, 1978. - 237 p.
3. Кашпур В.А., Малеев В.Я., Щеголева Т.Ю. Исследование гидратации глобулярных белков дифференциальным диэлектрометрическим методом // Молекуляр. биология. - 1976. - 10, № 3. - С.568-574.
4. О поглощении растворов ДНК в диапазоне 9-12 ГГц /В.Я.Малеев, В.А.Кашпур, Г.И.Глибицкий и др. // Биополимеры и клетка. - 1986. - 2, № 1. - С. 35-38.
5. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. - М.: Изд-во стандартов, 1972. - 412 с.
6. Любимов Ю.А., Набоков О.А. Комплексная диэлектрическая проницаемость и диэлектрическая релаксация воды вдоль кривой сосуществования // Ж.физ.химии. - 1985. - 59, № 6. - С.1435-1436.
7. Дебай П. Полярные молекулы.-М.:Гостехтеоретиздат,1931.-230 с.

УДК 577.35:537

В.С.Банников, О.Ю.Веденский, Г.П.Ермак И.С.Абраменко, О.Л.Колесник, Б.К.Скрынник, В.П.Шестопалов

НОВЫЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ БИООБЪЕКТОВ

Исследования функционирования относительно активных нервных систем, таких как, например, аксоны или сетчатка глаза земноводных, сопряжены с серьезными экспериментальными трудностями и осуществляются в большинстве случаев с помощью отведения электрических потенциалов посредством микро- и макроэлектродов от отдельных нервных клеток или групп нейронов. Однако использование для этой цели электродов имеет существенные недостатки: неизбежный травматический эффект, вызванный проколом клеточной мембраны, и неопределенность пространственного расположения электрода в препарате. Частично от этих недостатков можно избавиться при регистрации импульсной активности так называемыми оптическими методами [1], однако они, в свою очередь, также не лишены серьезных недостатков: более низким, чем в микроэлектродных методах, отношением сигнал - шум, возможностью побочных фармакологических эффектов и фотодинамического повреждения клеток при введении потенциалочувствительных красителей, что сказывается на функционировании нейронов, а также ограничением глубины зондирования, определяемой глубиной проникновения красителей, не превышающей 800 мкм [1]. К тому же описанные в литературе оптические методы достаточно условно можно отнести к неинвазивным, хотя бы в связи с упомянутыми побочными фармакологическими и фотодинамическими эффектами.

С развитием термовизионной техники, позволяющей проводить дистанционную регистрацию температуры тел по их ИК излучению, получили развитие термовизионные методы анализа тепловых эффектов, связанные с функциональным состоянием нервной ткани [2, 3]. Эти методы дали возможность анализировать нервные процессы по избыточному тепловому излучению отдельных нейронов, в частности трансплантанта гиппокампа в передней камере глаза крысы [3]. Безусловно, термовизионный метод может стать весьма полезным в исследованиях пространственно-временной организации функционирования биологических систем, однако только в случае процессов, сопровождающихся заметным тепловыделением.

В настоящее время достигнуты заметные успехи в технике миллиметрового (мм) и субмиллиметрового диапазонов волн, связанные с разработкой высококогерентных источников электромагнитных колеба-

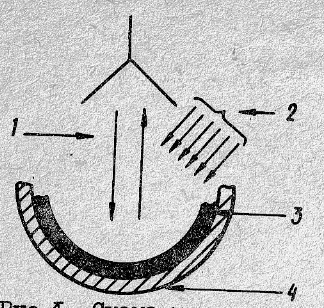


Рис.1. Схема исследуемого объекта: 1 - СВЧ сигнал; 2 - световой поток; 3 - сетчатка; 4 - глазной бокал

ний, а именно генераторов дифракционного излучения (ГДИ) [4]. ГДИ может функционировать в виде законченной радиосистемы, выполняющей замкнутый цикл в радиоспектроскопических и дефектоскопических измерениях [5]. Это позволяет ставить вопрос об их применении для диагностики функционального состояния активных биообъектов, в частности нервных систем. Речь идет о локальной микролокации активных биосистем ограниченными пучками электромагнитных волн нетепловой интенсивности. Этому вопросу и посвящена настоящая работа, в частности возможности бесконтактного определения физиологического состояния изолированного глазного бокала глаза Rana temporaria при воздействии импульсов света.

Известно, что электромагнитные волны указанных диапазонов сильно поглощаются биологическими объектами и влияние электромагнитного поля оказывается сосредоточенным в сравнительно узкой зоне на поверхности биологического объекта, причем при соизмеримости длины волны падающего излучения с характерными размерами биологической ткани или биологического объекта в целом поглощение может носить сложный нелинейный характер, определяемый как длиной волны, так и поляризацией, а также ориентацией вектора Пойтинга падающей волны относительно фазового центра биологического рассеивателя, диэлектрическими и геотермическими параметрами последнего. Эти факторы должны учитываться при выборе методик проведения эксперимента.

Предварительные эксперименты показали, что удобным параметром, позволяющим достаточно адекватно описать функциональное состояние изолированного глазного бокала глаза Rana temporaria, может служить коэффициент отражения электромагнитной волны, испытывающий сильное приращение при прохождении нервного импульса,вызванного световым сигналом.

Изолированный глазной бокал (рис.1) можно представить,согласно А.Л.Бызову [6],как полупроводниковую структуру,сопротивление которой $R \approx$ 650 Ом.При проведении нервного импульса в сетчатке открываются ионные каналы и по ее поверхности и в подповерхностных слоях $L \sim$ 200 мкм появляются токи,ответственные за проведение потенциала действия.При облучении глазного бокала в мо-

мент проведения сетчаткой нервного импульса изменяются граничные условия, обусловленные наличием на границе раздела поверхностного тока. Это приводит к скачку нормальной компоненты вектора электрической напряженности и тангенциальной компоненты вектора напряженности магнитного поля.

Изолированный глазной бокал представляет собой незамкнутую сферическую поверхность, причем облучение электромагнитной волной производится со стороны сферической полости объекта, т.е. со стороны сетчатки (см. рис. 1). Известно, что в подобной структуре возникают только волны гибридного типа [7], имеющие все шесть компонент электромагнитного поля.

Поле, отраженное от изолированного глазного бокала, на приемнике в скалярном приближении Кирхгофа для магнитного потенциала Дебая $\Pi_S^m(r,\theta,\varphi)$ представляется в виде

$$\Pi_S^m(r,\theta,\varphi)=\iint_{S_R}\Pi_i^m(r,\theta,\varphi)\frac{\partial J(r,\theta)}{\partial n}\,dS_R+\iint_{S_R}J(r,\theta)\frac{\partial\Pi_i^m(r,\theta,\varphi)}{\partial n}\,dS_R, \quad (1)$$

где $\Pi_i^m(r,\theta,\varphi)$ - падающая на объект волна; $J(r,\theta)$ - функция Грина сферической полости.

Первый член в выражении (1) определяет отражение от биологического рассеивателя при отсутствии нервного импульса, т.е. когда скачок нормальной производной на границе раздела равен 0:

$$\left.\frac{\partial\Pi_i^m(r,\theta,\varphi)}{\partial n}\right|_{\Gamma}=0. \quad (2)$$

Второй член в (1) определяет отражение от биологического рассеивателя при проведении им нервного импульса. Однородное условие Неймана в этом случае заменяется смешанным граничным условием

$$\frac{\partial\Pi_i^m(r,\theta,\varphi)}{\partial n}+g(r,\theta,\varphi)\,\Pi_i^m=0, \quad (3)$$

а функция $g(r,\theta,\varphi)$, определяющая возмущение границы раздела, является непрерывной функцией поверхностных координат [7].

Таким образом, из (1) и (3) видно, что приращение полного поля на приемнике определяется только поведением функции поверхностного возмущения $g(r,\theta,\varphi)$

$$\Delta\Pi_S^m=\iint_{S_R}\Pi_i^m\left(\frac{\partial J(r,\theta)}{\partial n}\right)-J(r,\theta)\,g(r,\theta,\varphi)\,dS_R,$$

так как апертурная функция $\Pi_i^m(r,\theta,\varphi)$ и функция Грина, а также ее

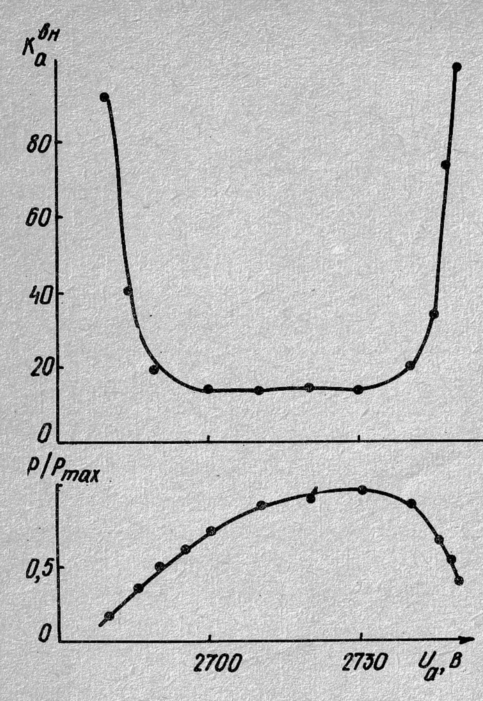


Рис.2. Зависимость коэффициента автодинного усиления и мощности генерации ГДИ от ускоряющего напряжения

нормальные производные являются неизменными величинами при одних и тех же геометрических размерах объекта, ориентации его относительно вектора Пойтинга падающей волны, поляризации и длины волны электромагнитных колебаний.

Сигнал, отраженный от исследуемого объекта, измерялся радиолокационным методом с помощью высококогерентного ГДИ автодина [5] мм диапазона с внешним детектированием сигнала.

Как известно, автодинные ГДИ позволяют осуществлять излучение и прием отраженных от исследуемых объектов сигналов в строго обратном направлении по одному волноведущему тракту, связывающему антенну с СВЧ выводом энергии. При этом ГДИ автодин совмещает функции передатчика, усилителя СВЧ сигнала, гетеродина и смесителя. Реакция автодина на принимаемый сигнал проявляется в виде автодинного отклика колебаний его резонансной системы. Причем величина этого отклика может значительно (в несколько сот раз) превышать амплитуду принимаемого сигнала. Выражение для амплитуды автодинного сигнала имеет вид

$$a(t) = -\frac{\Gamma}{2} K_a A_0 \cos(\delta - \psi_\tau),$$

где Γ – коэффициент отражения; K_a – коэффициент автодинного усиления, показывающий, во сколько раз амплитуда a автодинного отклика превышает амплитуду ΓA_0 отраженного сигнала; δ – суммарный сдвиг фазы излученного и отраженного сигналов; $\psi_\tau = \omega_D t$ для неподвижных объектов равен нулю.

При внешнем детектировании автодинный сигнал измеряется на детекторе, включенном в одно из плеч трехдецибельного ответвителя. Отношение a к невозмущенной амплитуде A_0 определяется выражением

$$a/A_0 \simeq -\Gamma K_a^{вн} \cos\delta.$$

Значение коэффициента автодинного усиления $K_a^{вн}$ зависит от выбора рабочей точки в пределах зоны генерации ГДИ. На рис.2 приведены типичные зависимости $K_a^{вн}$ и мощности генерации P от ускоряющего напряжения в пределах зоны электронной перестройки ГДИ автодина. Как видно, $K_a^{вн}$ существенно возрастает вблизи краев зоны генерации, что способствует предварительному усилению принимаемых сигналов и увеличению соотношения сигнал – шум на выходе автодинного приемопередатчика.

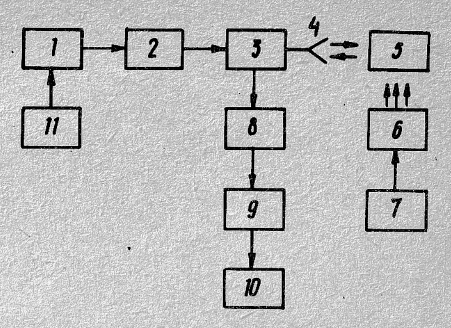


Рис.3. Структурная схема установки: 2 – согласующий трансформатор; 7 – блок управления; 9 – усилитель; II – блок питания ГДИ

Характеристики биообъектов определялись на установке (рис.3). Сигнал ГДИ автодина 1 через ответвитель 3 и рупорную антенну 4 излучался в направлении глазного бокала 5 и, отражаясь от него, возвращался по тому же волноводному тракту в ГДИ. Воздействие световым импульсом осуществлялось лампой-вспышкой 6, установленной в непосредственной близости от исследуемого объекта, помещенного в центре круглого лучевода на подвижной согласованной нагрузке. Регистрация автодинного отклика производилась полупроводниковым детектором 8, включенным во второе плечо ответвителя 3. Продетектированный сигнал после усиления записывался самописцем 10.

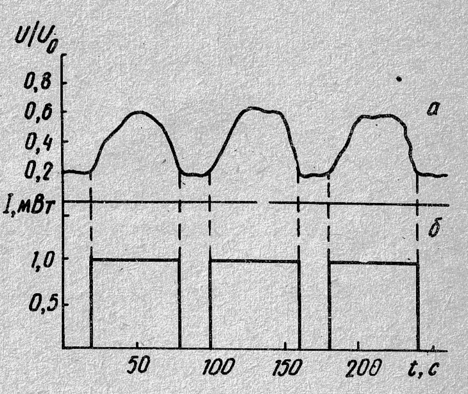


Рис.4. Изменение автодинного отклика U от воздействия светового стимула I

В этом эксперименте объект устанавливался в положение максимального отражения падающей электромагнитной волны. Сетчатка изолированного глазного бокала возбуждалась световым стимулом интенсивности $I \simeq 1$ мВт с частотой следования 0,05 Гц и длительностью 60 с.

Экспериментальные данные изменения автодинного отклика U от

светового стимула *I* приведены на рис.4. Отмечается заметное изменение коэффициента отражения при включении и выключении возбуждающего светового стимула (рис. 4,б) и адекватного ему приращения автодинного сигнала (рис. 4,а). Одной из возможных причин приращения отраженного сигнала является взаимодействие электрических и магнитных мультиполей, индуцированных в биологическом объекте падающей электромагнитной волной с микрополем, обусловленным проведением сетчаткой нервного импульса. Не исключено также, что падающая волна может эффективно взаимодействовать с генерируемой светом плазмой ионов в фоторецепторных клетках сетчатки.

Более детальные эксперименты, по мнению авторов, позволят установить механизмы возникновения регистрируемого сигнала и расширить область применения методики микролокации на более широкий класс объектов и процессов в биосистемах.

1. Ягодин С.В., Ноздрачев А.Д., Пушкарев Ю.П. Проблемы фоторегистрации электрических процессов в нервных сетках // Успехи физиол. наук. - 1986. - 17, № 4. - С. 111-115.
2. Термоответы мозга на сенсорную стимуляцию / К.П.Будко, Э.Э.Годик, А.М.Горбач и др. // Докл. АН СССР. - 1984. - 278, № 2. - С. 486-491.
3. Тепловая активность изолированного фрагмента мозга / Е.П.Хижняк, А.Г.Брагин, Г.Р.Иваницкий и др. // Биофизика. -1986.- 31, № 5. - С. 897-901.
4. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники: В 2 т. - Киев: Наук. думка, 1985. - Т. 2. - 256 с.
5. Автодинный эффект в генераторе дифракционного излучения / Г.П.Ермак, А.Б.Лебедев, К.А.Лукин и др. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1986. - 29, № 8. - С. 957-966.
6. Бызов А.Л. Электрофизические исследования сетчатки. - М.: Наука, 1966. - 90 с.
7. Шестопалов В.П. Сумматорные уравнения в современной теории дифракции. - Киев: Наук.думка, 1983. - 252 с.

УДК 538.569:57

С.В.Шияновский

СПИНОВЫЙ МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

За последние 20 лет накоплен обширный экспериментальный материал о влиянии низкоинтенсивного излучения миллиметрового диапазона на жизнедеятельность различных организмов [1-7]. Однако сложность изучаемых объектов и противоречивость экспериментальных данных не позволили к настоящему времени выяснить первичный механизм воздействия миллиметрового излучения (ММИ) на молекулярном уровне, не говоря уже о последующей цепи реакций в высокоорганизованных организмах.

Анализ имеющихся экспериментальных результатов показывает [8], что все наблюдаемые эффекты влияния ММИ на различные биологические объекты можно разделить на две группы. Первая зависит главным образом от интенсивности поглощенного излучения и не имеет специфических частотных особенностей. Вторая группа эффектов отличается прежде всего резонансной зависимостью от частоты излучения. Отношение ширины резонанса к частоте составляет обычно $10^{-2} - 10^{-4}$, причем для резонансных эффектов характерна пороговая зависимость от интенсивности излучения и длительности облучения.

Наблюдение резонансных эффектов на биологических объектах всех уровней, вплоть до одноклеточных, позволяет сделать предположение о существовании универсального резонансного механизма воздействия ММИ на молекулярном уровне. В работе [9] была высказана гипотеза, что этот механизм может быть обусловлен взаимодействием магнитной составляющей ММИ со спиновой подсистемой промежуточных продуктов биохимических реакций. Подтверждают эту гипотезу эксперименты по влиянию резонансного поглощения СВЧ поля на физические процессы и химические реакции [10-12]. Недавно Кайлманом [13] была сделана попытка численного описания экспериментальных результатов [14-16] в рамках спинового механизма. Автору удалось достичь количественного согласия с экспериментальными данными, однако он пренебрег процессами релаксации между подуровнями. Поэтому справедливость результатов работы [13] и вообще эффективность воздействия ММИ через спиновую подсистему [9] определяются тем, насколько существенной оказывается релаксация между спиновыми подуровнями.

Цель настоящей работы - анализ кинетики заселенности триплетных подуровней и определение скорости релаксации между подуровнями, обусловленной вращением молекул.

1. Кинетика заселенности спиновых подуровней под облучением.

Влияние постоянного и переменного магнитных полей на спиновую подсистему обычно рассматривается в рамках двух механизмов: радикального и триплетного. Радикальный связан с изменением полного спина системы, состоящей из двух слабосвязанных частей с ненулевыми спинами. Триплетный механизм обусловлен изменением заселенности подуровней мультиплета (обычно триплета).

Следует отметить, что возможность синглет-триплетных переходов в радикальных парах (РП) обусловлена тем, что радикалы значительную часть времени существования РП находятся на большом расстоянии друг от друга, так что энергии синглетного и триплетного состояний оказываются одинаковыми. Поэтому наблюдается резонанс на нулевой частоте, обеспечивающий эффективное влияние постоянно-

го магнитного поля. В то же время отсутствие в дублет-дублетных РП энергетических уровней с зазором, соответствующим ММИ, не позволяет рассчитывать на резонансное взаимодействие ММИ с РП.

Триплетный механизм может реализоваться, поскольку на промежуточных стадиях биохимических процессов достаточно часто образуются молекулы и комплексы со спином $S \geq 1$. В дальнейшем будем рассматривать триплетное состояние, хотя полученные результаты справедливы и для состояний с более высокой мультиплетностью. Триплетное состояние имеет три подуровня, энергии которых слегка различаются вследствие электрон-электронного взаимодействия – так называемое расщепление в нулевом поле (РНП). Между подуровнями разрешены магнитодипольные переходы. Частоты переходов между подуровнями сильно зависят от электронной структуры молекул. Для большинства органических молекул, как и для пуринов и пиримидинов, частоты переходов лежат в диапазоне 1–10 ГГц [17]. Для производных нитрена эти частоты достигают 50 ГГц, а для металло-протеиновых комплексов (типа миоглобина) - 300 ГГц [18]. Из приведенных значений частот видно, что ММИ может резонансно возбуждать переходы между подуровнями и менять их заселенность.

При комнатной температуре равновесная заселенность подуровней практически одинакова, поскольку разность энергий подуровней не превышает 10^{-2} Тл. Поэтому влияние ММИ в равновесных условиях пренебрежимо мало. Однако при образовании триплетных молекул оптическими и химическими способами скорость заселения подуровней существенно различна. Если в триплетном состоянии происходит разветвление цепей реакций (а именно такие состояния представляют для нас интерес), то вероятности ухода в определенный канал с различных подуровней также будут различаться. Поэтому в условиях постоянной накачки и гибели триплетов ММИ может изменять заселенность подуровней и распределение между каналами.

Рассмотрим кинетику заселенности подуровней с помощью уравнений Блоха (рисунок). Такое описание справедливо, если время поперечной релаксации T_2 мало по сравнению с характерными временами изменения заселенности:

$$\dot{n}_i = B_i - (k_i + r_i)\,n_i + \sum_{i \neq j} (W_{ji}\, n_j - W_{ij}\, n_i), \qquad (1)$$

где B_i и k_i – соответственно скорости заселения и распада подуровня i; r_i – скорость химической реакции на подуровне i.

Скорость переходов между подуровнями $W_{ij} = \rho_{ij} + \mu_{ij}$ определяется спин-решеточной релаксацией ρ_{ij} и магнитодипольными переходами μ_{ij}, стимулированными ММИ.

Рассмотрим случай, когда частота ММИ ν близка к частоте ν_{12} перехода между уровнями 1 и 2. Скорость радиационного перехода μ_{12} описывается формулой

$$\mu_{12} = \frac{\pi}{24}\gamma^2 \mu_0^2 H_0^2 f(\nu - \nu_{12}), \qquad (2)$$

где $\gamma = 4{,}912 \cdot 10^{11}$ м$^2 \cdot$ В$^{-1} \times$ с$^{-2}$ – гиромагнитное отношение электронов; H_0 – амплитуда магнитного поля $H = H_0 \cos 2\pi\nu t$; f – форма резонансной линии поглощения $\int_0^\infty f(\nu)\,d\nu = 1$.

В работе [13] в предположении малости спин-решеточной релаксации проанализировано стационарное решение системы (1) и найдена полная скорость реакции $R = \sum_i n_i r_i$.

В отсутствие ММИ скорость реакции

$$R_0 = \frac{B_1}{1 + k_1/r_1} + \frac{B_2}{1 + k_2/r_2} + \frac{B_3}{1 + k_3/r_3}. \qquad (3)$$

В условиях насыщающего ММИ

$$R_s = \frac{B_1 + B_2}{1 + (k_1 + k_2)/(r_1 + r_2)} + \frac{B_3}{1 + k_3/r_3}. \qquad (4)$$

Схема кинетических процессов на триплетных подуровнях

Таким образом, существует критическая интенсивность ММИ (I_c), такая, что при $I \ll I_c$ эффект отсутствует, а при $I \gg I_c$ он не зависит от интенсивности. Величина I_c может быть найдена из условия $\mu_{12} = \tau_{12}^{-1}$, где $\tau_{12} = (k_1 + r_1)^{-1} + (k_2 + r_2)^{-1}$ – некоторое эффективное время жизни триплета. Используя формулу (2) и выражение $I = c\mu_0 H_0^2/2$, получаем в резонансе лоренцевой кривой с полушириной $\Delta\nu$

$$I_c\,[\text{Вт}/\text{м}^2] = 6{,}217 \cdot 10^{-9}\,\Delta\nu\,[\text{Гц}]/\tau_{12}\,[\text{с}]. \qquad (5)$$

Формула (5) использовалась для анализа экспериментальных ре-

зультатов работ [15, 16]. Измеренное 10 %-ное изменение скорости роста дрожжей объяснить нетрудно, так как величины B_i, k_i и r_i могут различаться на порядок для разных подуровней. Сложнее объяснить наблюдаемое значение интенсивности I_c = 10 Вт/м^2. Кайлман [13] предположил, что ширина резонансной линии поглощения совпадает с шириной максимума частотной зависимости роста дрожжей $\Delta\nu$ = = 8 МГц. В этом случае из (5) следует, что τ_{12} = $5\cdot10^{-3}$ с. Найденное значение τ_{12} согласуется с возможными значениями k_i и r_i, однако необходимо отметить, что формулы (3) и (4) получены при условии малости спин-решеточной релаксации $P_{ij} \ll \tau_{ij}^{-1}$. Легко видеть, что при выполнении обратного неравенства $P_{ij} > \tau_{ij}^{-1}$ устанавливается равновесие между подуровнями и ММИ не может дать никакого эффекта.

Таким образом, справедливость результатов работы [13] и вообще эффективность воздействия ММИ через спиновую подсистему [9] определяются скоростью спин-решеточной релаксации между подуровнями. Если скорость релаксации выше определенного значения P_{max}, то спиновый механизм не может описать экспериментальные результаты. Величина P_{max} может быть найдена из формулы (5) при учете того, что $\Delta\nu \gg \tau_{12}^{-1}$:

$$P_{max}\,[c^{-1}] = 1{,}27\cdot10^4\sqrt{I_c}\,[Вт/м^2]. \qquad (6)$$

Поэтому далее проанализированы основные механизмы спин-решеточной релаксации в биологических структурах и рассчитан вклад вращения молекул в релаксацию.

2. Спин-решеточная релаксация между триплетными подуровнями. Для возникновения спин-решеточной релаксации необходимо существование некоторого нестационарного взаимодействия со спиновой подсистемой. В твердых телах наиболее эффективные релаксационные процессы обусловлены колебаниями решетки, в жидкостях - поступательным и вращательным движениями молекул.

В биологических структурах трансляционная диффузия, по-видимому, не должна играть существенной роли, так как для больших макромолекул она заторможена и слабо влияет на параметры спиновой подсистемы. Для изучения влияния вращения рассмотрим подробнее особенности триплетных состояний в органических молекулах и металлоорганических комплексах.

Триплетное состояние образуется двумя неспаренными электронами. Основными взаимодействиями, зависящими от спинового состояния электронов, являются зеемановское взаимодействие с внешним постоянным магнитным полем, спин-орбитальное и взаимодействие магнит-

ных диполей этих электронов. Для органических молекул соответствующая часть гамильтониана записывается в виде [19]

$$\mathcal{H} = g\beta\vec H(\vec S_1 + \vec S_2) + g^2\beta^2\left[\frac{(\vec S_1\vec S_2)}{R^3} - \frac{3(\vec S_1\vec R)(\vec S_2\vec R)}{R^5}\right], \qquad (7)$$

где g - g-фактор; β - магнетон Бора; $\vec R$ - вектор, соединяющий два электрона.

Для получения эффективного спин-гамильтониана необходимо вычислить матричные элементы гамильтониана и выразить их через компоненты полного спина системы

$$\mathcal{H}_e = g\beta\vec H\vec S + \vec S\hat D\vec S, \qquad (8)$$

где $\hat D$ - симметричный тензор, называемый тензором РНП. Его компоненты имеют вид

$$D_{ij} = \frac{1}{2}g\beta\left\langle \psi_0 \left| \frac{R^2\delta_{ij} - 3R_iR_j}{R^5} \right| \psi_0\right\rangle, \qquad (9)$$

где ψ_0 - волновая функция электронов.

Для ионов переходных металлов в металлоорганических комплексах эффективный спин-гамильтониан также описывается формулой (8), но тензор $\hat D$ обусловлен спин-орбитальным взаимодействием:

$$D_{ij} = -\xi^2\sum_n \frac{\langle\psi_0|L_i|\psi_n\rangle\langle\psi_n|L_n|\psi_0\rangle}{E_n - E_0}, \qquad (10)$$

где ξ - константа спин-орбитального взаимодействия; E_n и ψ_n - соответственно энергия и волновая функция возбужденного состояния n.

В системе координат, в которой тензор $\hat D$ диагонален, спин-гамильтониан имеет вид

$$\mathcal{H}_e = g\beta\vec H\vec S - [\mathcal{E}_x S_x^2 + \mathcal{E}_y S_y^2 + \mathcal{E}_z S_z^2]. \qquad (11)$$

Главной качественной особенностью спин-гамильтониана (11) является то, что зеемановский член и слагаемое в квадратных скобках имеют различные наборы собственных функций. Для зеемановского слагаемого собственными будут функции T_{-1}, T_0, T_1 с фиксированными значениями проекции спина на направление магнитного поля. В случае нулевого магнитного поля собственными функциями и энергиями являются T_α и $\mathcal{E}_\alpha$ ($\alpha = x, y, z$). Индексы x, y, z указывают, что для этих функций равны нулю проекции спина на соответствующие оси системы координат, в которой диагонален тензор $\hat D$.

Необходимо отметить, что если собственные функции зеемановского взаимодействия имеют постоянную ориентацию, то собственные функции дипольного взаимодействия электронов связаны с осями молекулы. Поэтому вращение молекулы приводит к нестационарному сдвигу энергетических уровней и интенсивным переходам между ними.

Влияние вращения на спин-решеточную релаксацию широко изучалось в связи с экспериментами по ЭПР и ЯМР [20]. Однако между выполненными исследованиями и рассматриваемым в данной работе случаем имеется существенное различие. Измерения спектров ЭПР и ЯМР проводятся в сильных постоянных магнитных полях, когда зеемановское расщепление, как правило, превышает РНП. В этих условиях взаимодействие магнитных диполей электронов играет роль оператора нестационарного возмущения, зависящего от ориентации молекулы, и скорость перехода между подуровнями связывается пропорциональной квадрату РНП.

В случае, когда постоянное магнитное поле отсутствует, вращение молекулы не приводит к изменению спектра триплета. Причиной спин-решеточной релаксации является неадиабатичность вращения по отношению к переходам между подуровнями. Для расчета воспользуемся нестационарным уравнением Шредингера

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=\mathcal{H}_0\psi, \qquad (12)$$

где $\mathcal{H}_0=-\varepsilon_x S_x^2-\varepsilon_y S_y^2-\varepsilon_z S_z^2$ – спин-гамильтониан в отсутствие магнитного поля. Представим ψ в виде разложения по собственным функциям T_i в молекулярной системе координат

$$\psi=\sum_j A_j T_j \exp\left\{-\frac{i}{\hbar}\varepsilon_j t\right\}. \qquad (13)$$

Поскольку T_i преобразуются как орты декартовой системы координат

$$\frac{\partial T_i}{\partial t}=e_{ijk}\Omega_j T_k, \qquad (14)$$

где Ω_j – вектор угловой скорости в молекулярной системе координат, то получим систему уравнений для коэффициентов A_i :

$$\frac{\partial A_i}{\partial t}=e_{ijk}\Omega_j A_k \exp\left\{-\frac{i}{\hbar}(\varepsilon_k-\varepsilon_i)t\right\}. \qquad (15)$$

Рассмотрим переход из состояния T_x $(A_x(0)=1,\ A_y(0)=0,\ A_z(0)=0)$. В первом порядке теории возмущений

$$A_y(t)=\int_0^t \Omega_z(t_1)e^{-2\pi i\nu_{xy}t_1}dt_1. \qquad (16)$$

Вероятность нахождения системы в состоянии T_y в момент времени

$$P_y(t)=\left|A_y(t)\right|^2=\int_0^t\int_0^t dt_1\,dt_2\,\Omega_z(t_1)\,\Omega_z(t_2)\,e^{-2\pi i\nu_{xy}(t_1-t_2)}. \qquad (17)$$

В предположении, что коррелятор имеет экспоненциальный закон затухания $\langle\Omega_z(t_1+\Delta t)\Omega_z(t_1)\rangle=\langle\Omega_z^2\rangle e^{-|\Delta t|/\tau_z}$, найдем вероятность перехода

$$P_{xy}=\langle\Omega_z^2\rangle\frac{2\tau_z}{1+(2\pi\nu_{xy}\tau_z)^2}. \qquad (18)$$

Из закона равнораспределения $\frac{1}{2}I_z\langle\Omega_z^2\rangle=\frac{1}{2}k_Б T$ следует, что средняя угловая скорость $\bar{\Omega}_z=\sqrt{\langle\Omega_z^2\rangle}$ примерно обратно пропорциональна массе молекулы. Для молекулы с массой 10^5 а.е.м. $\bar{\Omega}_z\approx10^9$ с$^{-1}$. Поэтому в качестве приемников ММИ через спиновую подсистему могут выступать только крупные молекулы или комплексы, обладающие большим РНП. По-видимому, единственными возможными кандидатами являются комплексы ионов переходных металлов, в которых скорости спин-решеточной релаксации P_{ij} могут находиться в диапазоне 10^3–10^5 с$^{-1}$. Такие комплексы – важная структурная единица целого ряда ферментов, и они активно участвуют в биохимических реакциях.

Поскольку в реальных условиях всегда присутствуют слабые постоянные магнитные поля (например, поле Земли), целесообразно рассмотреть вклад зеемановского слагаемого в релаксацию. В этом случае для коэффициентов A можно записать

$$\frac{\partial A_i}{\partial t}=e_{ijk}(\Omega_j+g\beta H_j)A_k\exp\left\{-\frac{i}{\hbar}(\varepsilon_k-\varepsilon_i)t\right\}, \qquad (19)$$

где H_j – проекции магнитного поля на молекулярные оси.

В изотропной структуре отсутствует корреляция между ориентацией молекулы и ее угловой скоростью, поэтому, проводя аналогичные вычисления, получаем

$$P_{xy}=\frac{2\bar{\Omega}_z^2\,\tau_z}{1+(2\pi\nu_{xy}\tau_z)^2}+\frac{2g^2\beta^2H^2\tilde{\tau}_z}{3[1+(2\pi\nu_{xy}\tau_z)^2]}, \qquad (20)$$

где $\tilde{\tau}_z$ – корреляционное время ориентации молекулярной оси z, причем $\tilde{\tau}_z\neq\tau_z$ (как правило $\tilde{\tau}_z>\tau_z$).

Поскольку $g\beta$ = 35,2 кГц · м/А, постоянные магнитные поля, не превышающие 2 кА/м, не вносят существенного вклада в релаксацию.

Выводы

1. Условие малости спин-решеточной релаксации является наиболее принципиальным для реализации спинового механизма воздействия ММИ на биологические объекты.

2. Металлоорганические комплексы ионов переходных металлов с большими РНП, по-видимому, единственные кандидаты на роль спиновых рецепторов ММИ в живых организмах.

3. Постоянные магнитные поля, не превышающие 2 кА/м, не оказывают существенного влияния на спин-решеточную релаксацию.

Работа выполнена в рамках программы временного коллектива "Отклик. Автор благодарен В.И.Сугакову и участникам теоретического семинара ВК "Отклик" за полезные обсуждения полученных результатов.

1. Научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР// Успехи физ. наук. - 1973. - 110, № 3. - С. 452-469.
2. Tyler F.E. Biological effects on nonionizing radiation // Ann. Acad. Sci. N.Y. - 1975. - 247. - P. 21-25.
3. Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Под ред.Н.Д.Девяткова. - М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1981. - 338 с.
4. Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические аспекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М.: Ин-т радиоэлектрон. АН СССР, 1983. - 230 с.
5. Проблемы экспериментальной и прикладной электромагнитобиологии. - Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1983. - 209 с.
6. Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М.: Ин-т радиоэлектрон. АН СССР, 1985. - 221 с.
7. Биологические эффекты электромагнитных полей. Вопросы их использования и нормирования. - Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР,1986.- 151 с.
8. Девятков Н.Д., Бецкий О.В., Голант М.Б. Научное обоснование возможности использования электромагнитных излучений миллиметрового диапазона малой мощности в медицине и биологии / Биологические эффекты электромагнитных полей. Вопр. их использования и нормирования. - Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1986. - С. 75-94.
9. Ситько С.П., Сугаков В.И. О роли спиновых состояний белковых молекул // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1984. - № 6. - С. 65-66.
10. Франкевич Е.Л. Спиновые эффекты в элементарных процессах химии высоких энергий // Химия высоких энергий. - 1980. - 14, № 3. - С. 195-210.
11. Франкевич Е.Л. Магнитно-резонансная модуляция скоростей реакций // Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М., 1981. - С. 204-248.
12. Clarke R.H. Triplet state ODMR spectroscopy. - New York: Wiley, 1982. - 158 p.
13. Kielmann F. Triplet-selective chemistry : a possible cause of biological microwave sensitivity // Z. Naturforsch. C. - 1986. - 41. - P. 795-798.
14. Grundler W., Lielmann F., Fröhlich H. Resonant growth rate response of yeast cells irradiated by weak microwaves //Phys. Lett. A. - 1977. - 62. - P. 463-466.
15. Grundler W., Kielmann F. Nonthermal effects of millimeter microwaves on yeast growth // Z. Naturforsch. C. - 1978. - 33. - P. 15-21.

16. Grundler W., Kielmann F. Sharp resonances in yeast growth prove nonthermal sensitivity to microwaves // Phys. Rev. Lett.- 1983. - 51, N 13. - P. 1214-1216.
17. Мак-Глинн С., Адзуми Т., Киносита М. Молекулярная спектроскопия триплетного состояния. - М.: Мир, 1972. - 448 с.
18. Ингрэм Д. Электронный парамагнитный резонанс в биологии. - М.: Мир, 1972. - 296 с.
19. Керрингтон А., Мак-Лечлан Э. Магнитный резонанс и его применение в химии. - М.: Мир, 1970. - 447 с.
20. Абрагам А. Ядерный магнетизм. - М.: Изд-во иностр. лит.,1963.- 551 с.

УДК 576.315:581.5:575.042

Н.Г.Шестопалова, Л.Н.Головина, А.А.Петрушин, В.К.Корнеенков

РЕАКЦИЯ КЛЕТОК РАСТЕНИЙ НА ДЕЙСТВИЕ РАДИОВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Научно-технический прогресс сопровождается постоянно увеличивающимся антропогенным влиянием на биосферу. Важным новым экологическим фактором, действующим на растения, животные и микроорганизмы, является электромагнитное излучение радиочастотного диапазона. Изучение механизмов повреждения, репарации и адаптации клеток к изменяющимся условиям внешней среды - одна из важнейших проблем современной биологии. Бо́льшая часть сведений о влиянии радиоволн на клетки и организмы получена в опытах с лабораторными животными и микроорганизмами [1, 2, 5, 7, 8].

Цель настоящей работы - изучение влияния радиоволн миллиметрового (мм) диапазона на комплекс взаимосвязанных показателей,определяющих размножение клеток растений и косвенно отражающих активность их генома - митотические индексы, частоту клеток с хромосомными аберрациями и синтез ДНК.

Основные результаты по интенсивности деления клеток получены нами при изучении модельных и практически важных объектов лука и креписа. Облучению подвергали точки роста первичных корешков семян гибридного лука Золотой шар х Призовой. Учет количества митозов проводили в меристеме корешков при прорастании семян или (значительно реже) луковиц. Корешки были выбраны потому, что их ткани отличаются четкостью строения. Это позволило ряду авторов построить математические модели роста и деления клеток в них.

Интенсивность деления является одним из объективных тестов, характеризующих чувствительность клеток к различного рода воздействиям. Учет этого показателя дает значительную информацию о характере и степени изменений, происходящих в организме после облучения. О влиянии радиоволн на процессы размножения клеток растений

имеются лишь единичные обобщения /9,10/. Исследования, где бы чувствительность меристематических клеток оценивалась с учетом времени воздействия и физиолого-генетического состояния объекта, практически отсутствуют. Представляло интерес проследить кинетику клеточного размножения в течение первых митотических циклов при прорастании семян, сопоставить эти данные с результатом цитогенетического анализа – состоянием хромосом и интенсивностью синтеза ДНК.

Для решения поставленной задачи облучению подвергали сухие семена и точки роста зародышевых первичных корешков лука (Allium cepa L.), конских бобов (Vicia faba L.) и скерды (Crepis capillaris).

Для облучения сухих и проросших семян использовалась специальным образом сконструированная установка, позволяющая контролировать распределение, интенсивность, частоту и поляризацию поля, которое непосредственно взаимодействует с объектом. Основным узлом этой установки является конфокальный открытый резонатор, в рабочий объем которого на подвесках, прозрачных для электромагнитных волн, помещались семена. Контроль за параметрами поля осуществлялся разработанным методом визуализации полей в открытых резонаторах. С помощью этого метода удается непрерывно следить за видимой картиной электромагнитного поля открытого резонатора, свободного от исследуемого объекта и при наличии его. Это позволяет создавать равные условия для облучения. Воздействия на семена и точки роста первичных корешков проводили в четырехмиллиметровом диапазоне длин волн; плотность потока мощности порядка 30 мВт/см^2. Фиксация опытного и контрольного материала начинали при появлении первых митозов (что было установлено специальными опытами) и проводили несколько раз в течение суток через каждые 3 ч. Для фиксации использовали ацеталкоголь (3:1). На каждую точку фиксации отбирали 8-10 корешков, из которых готовили давленые постоянные и временные препараты, окрашенные реактивом Шиффа по Фельгену, ацетоорсеином или ацетолакмоидом. Изучали 3-7 тыс. клеток каждой формы на один срок фиксации.

Результаты показали, что облучение сухих семян в четырехмиллиметровом диапазоне по-разному влияет на гибридный лук и его исходные формы – сорта Золотистый и Харьковский. Радиоволны незначительно изменяют темпы пролиферации исходных сортов, но задерживают на 8-10 ч вступление клеток в первый митоз у гибридной формы. В последующие сроки, к 20-му часу роста, задержка деления компенсируется его вспышкой и митотический индекс в опыте выше контрольного на 22 %. Угнетающий эффект радиоволн, наиболее четко выраженный у гибрида, имеет обратимый характер.

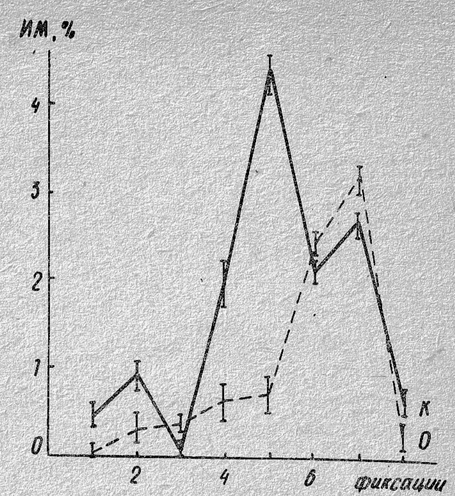


Рис.1. Изменение митотической активности клеток в течение первых митотических циклов при прорастании семян: О – опыт; К – контроль

Аналогичные результаты, свидетельствующие об угнетении первых клеточных делений и обратимости изменений, получены и в опыте с гибридным луком Стругановский х Красный круглый. На рис.1 показано, что в опытном варианте появление первой волны митозов на 6 ч позже по сравнению с контролем, а среднее значение митотической активности ниже почти в два раза.

Известно, что клетки основной меристемы корней проростков отличаются повышенной чувствительностью. Об этом свидетельствуют данные ряда авторов, изучавших воздействие на процессы клеточного размножения гамма-радиации и химических веществ [3]. Материалы настоящей работы показывают, что радиоволны мм диапазона (в использованном режиме) также являются ингибиторами репродукции клеток, что совпадает с данными о подавлении экспрессии генов под влиянием радиоволн [7].

Падение митотической активности в первые часы и дни после воздействия может быть связано с повреждением хромосом, уменьшением числа клеток, вступающих в митоз, а также торможением прохождения фаз митотического цикла.

Здесь уместно отметить, что задержка митозов была также обнаружена и после действия рентгеновских лучей, УФ радиации и других физических факторов [4].

Можно предположить, что использованный в работе вид излучения особой специфичностью не обладает и снижение митотической активности обусловлено физиологическим состоянием популяции чувствительных делящихся клеток. Обратимый характер изменений связан, по-видимому, с репопуляционным восстановлением.

Хромосомные аберрации в клетках корневой меристемы учитывали в основном анафазным методом. В каждом варианте анализировали по 100-300 ана-телофаз.

В результате анализа цитологических препаратов установлено

Частота клеток с хромосомными аберрациями в меристеме корней гибрида и исходных форм лука* (облучение сухих семян)

Сорт лука	Клетки с хромосомными аберрациями, %	Разница по сравнению с контролем P, %
Золотистый	15,9	99,9
Харьковский острый	12,2	99,8
Гибрид Золотистый х х Харьковский острый	14,4	98,8

* Показатели контрольных вариантов вычтены.

достоверное по сравнению с контролем повышение частоты клеток с повреждениями хромосом (таблица). Сравнение характера структурных изменений хромосом при воздействии на семена и активно пролиферирующие ткани меристемы показало, что они существенно различаются. В первом случае преобладали аберрации хромосомного типа (рис. 2, см. вклейку); после облучения точек роста хромосомы приобретали свойство "клейкости", наблюдался также кариолизис и пикноз интерфазных ядер.

В проявлении цитогенетического действия радиоволн имеется значительное сходство с ионизирующей радиацией. Установлено [6], что в зародышах семян лука **Allium cepa** более 90 % клеток находится на стадии G_1. Поэтому, когда облучалась естественно синхронизированная в G_1 популяция клеток (сухие семена), не было неожиданным появление аберраций именно хромосомного типа, так как их появление соответствовало состоянию хромосом в этот период митотического цикла. Несколько неожиданным было другое - увеличение структурных мутаций под действием данного вида излучения, отличающегося в энергетическом отношении от ионизирующей радиации. Возможно, появление хромосомных аберраций обусловлено опосредованным действием СВЧ поля и высокой чувствительностью делящихся клеток лука исследуемых сортов. На сегодняшний день механизмы мутагенеза не выяснены.

При изучении пролиферативных процессов особый интерес представляет синтез ДНК. Для оценки этого показателя мы применили метод авторадиографии, который дает возможность судить о периодичности внутриклеточных процессов, наблюдать приуроченность процессов биосинтеза к определенным структурам клетки и получить представление о степени их активности.

В качестве радиоактивной метки использовали H^3-тимидин, который, как известно, является единственным из четырех нуклеотидов,

участвующих в образовании полинуклеотидной структуры ДНК. Использование этого специфического предшественника ДНК позволяет избирательно метить клетки в процессе их редупликации.

Объектами исследования были корешки проростков из семян лука. Облучению подвергали точки роста корешков, достигших длины 2-2,5 мм. Исследовали клетки корневой меристемы в течение первых часов и дней роста проростков. Проростки инкубировали в водном растворе изотопа (концентрация 2 мкКи/мл, удельная активность 11,9 Ки/ммоль). На радиоавтографах учитывали индекс метки — ИМ (процент меченых ядер) и интенсивность метки (количество зерен восстановленного серебра в эмульсии над ядром). Мечеными считали клетки с числом зерен над ядром не менее 6 - 8.

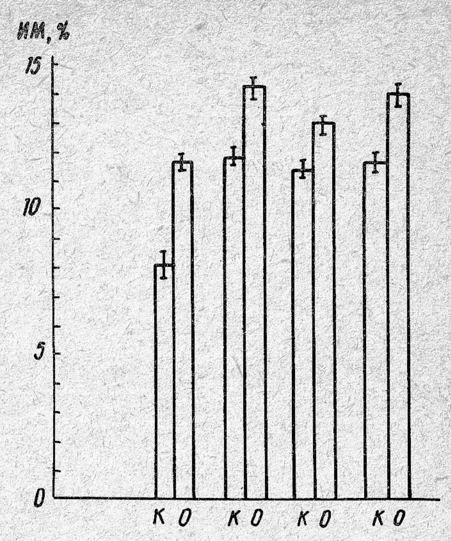


Рис.3. Процент меченых ядер в клетках корневой меристемы проростков лука: О, К - см. рис.1

Ткани зародыша семян представляют собой в значительной степени синхронную популяцию клеток. Однако при прорастании семян происходит десинхронизация и в первый митоз вступает только часть клеток - около 10 %. Корневая меристема - гетерогенная обновляющаяся ткань, клетки которой делятся асинхронно. В любой момент времени в популяции имеются клетки делящиеся и неделящиеся, находящиеся во всех фазах митотического цикла.

При кратковременном контакте проростков с меченым тритием - предшественником ДНК (импульсное мечение) - он включается только в те клетки, которые во время эксперимента находятся в S-периоде и в которых происходит редупликация ДНК. Отсутствие метки в некоторых интерфазных ядрах свидетельствует о том, что синтез ДНК или еще не начинался, или уже закончился. Учет меченых ядер позволяет судить о доли клеток популяции, в которых происходит синтез ДНК.

Частота встречаемости и изменение количества меченых H^3-тимидином ядер в популяции меристематических клеток на начальных этапах роста опытных и контрольных растений показана на рис.3. Видно, что в течение всего эксперимента после инкубации с изотопом частота меченых ядер в опыте выше, чем в контроле (12-14 % против 8 -

12 % в необлученных клетках). Уже в период первой фиксации, через 2 ч после контакта с меченым предшественником, индекс метки достигает 12 %, что в 1,5 раза превышает таковой у необлученных объектов.

В связи с тем что увеличение доли меченых ядер наблюдается в тканях опытных растений, деление клеток которых ингибируется и происходит нарушение структуры хромосом, а подавление процессов клеточного размножения в первые сроки после облучения сменяется его восстановлением до значения контроля, повышенный синтез ДНК можно интерпретировать как синтез репаративный, в результате которого негативные изменения носят обратимый характер, обусловленный происходящими в растениях процессами восстановления.

1. Девятков Н.Д. Об информационной сущности нетепловых и некоторых энергетических воздействий электромагнитных колебаний на живые организмы // Ж. техн. физики. - 1982. - № 1. - С.39-45.
2. Залюбовская Н.П. К оценке действия микроволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на различные биологические объекты: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - Днепропетровск, 1970. - 30 с.
3. Иванов В.Б. Пролиферация клеток в растениях. - М.: Наука, 1987. - 215 с.
4. Шестопалова Н.Г. Цитофизиологические проявления эффекта гетерозиса в норме и после облучения ЭМИ: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. - Харьков, 1975. - 53 с.
5. Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М. : Ин-т радиоэлектрон. АН СССР, 1983. - 220 с.
6. Brunory A., Ancora G. The DNA content of nuclei in the embrionic root apices of dry seeds of Allium cepa and their radiation response // Caryologia. - 1968. - 21, N 3. - P. 261-269.
7. Kremer F., Koschizizke C., Santol. The non-thermal effect of millimeter wave radiation on the putting of giant chromosomes // 13th Eur. Microwave conf.: Microwave 83. - Nürnberg, 1983. - P. 859-864.
8. Liburdy R.P., Vanek P.F. Microwaves and the cell membrane. II. Temperature, plasma and oxygen mediate microwave-induced membrane permeability in the erythrocyte // Radiat. Res. - 1985. - 102, N 2. - P. 190-205.
9. Baranski S., Szerski P. Microwave effects on mitosis in vivo and vitro // Genet. pol. - 1970. - 10, N 3-4. - P. 311-314.
10. Cieciura L., Hubner H. Wplyw promieniowania microfalowego na mitoze stozka wzrostowego korzonka bodu (vicia faba) // Med. pr. - 1971. - 22, N 2. - P. 211-220.

УДК 577:621.317.335.3.029.64

Л.Т.Малая, Т.Ю.Щеголева, Л.К.Бахова

ПРИМЕНЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВОЙ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

Патологические изменения на уровне живого организма обусловлены строго детерминированными нарушениями молекулярных механизмов клетки. Исследование организации и функционирования молекулярных комплексов биологических систем является важнейшим направлением современной биологии, биофизики и теоретической медицины. Цикл работ, проводимый в НИИ терапии Министерства здравоохранения УССР совместно с ИРЭ АН УССР, посвящен разработке метода слежения за работой молекулярных систем живой клетки по данным о перераспределении в этих процессах связанной и свободной воды. Настоящая работа посвящена сопоставлению результатов исследования методом СВЧ диэлектрометрии механизма повреждения аденилациклазной системы (АЦС) эритроцитов вследствие развития сердечно-сосудистой патологии с клиническими признаками. Выделение в этом механизме определяющего звена для данного вида патологии проанализировано на диаграммах воздействия $\varepsilon^*(n)$ на длине волны 7,6 мм. На рис. 1 приведены диаграммы воздействия (а) и восстановлена по ним система связей всего комплекса АЦС (б) по данным СВЧ диэлектрометрии [1]. Система по основным пунктам совпадает с известной из литературы, которая получена традиционными методами биохимии по анализу продуктов разрушения клетки после воздействия биологически активных веществ или их сочетаний. В отличие от традиционных методов СВЧ диэлектрометрия дает информацию в условиях неразрушающего контроля о состоянии клетки, что позволяет сделать ряд существенных дополнений в приведенную схему связей АЦС, например связь Ca -канала с α-рецептором, пространственное разнесение центров связи гормонов и $ПГЕ_2$ на β -рецепторе и т.п. [2].

Патологические повреждения рассмотрены на β -рецепторе по защитной функции $ПГЕ_2$ к связыванию гормона адреналина. Проведено прямое сопоставление клинических признаков с данным СВЧ диэлектрометрии по ответу клеточной системы на воздействия, изменяющие функцию β -рецептора. Кроме того, проведена цепь сопоставлений данных от моделей клеточного повреждения *in vitro* до модели развития ишемической болезни сердца (ИБС) *in vivo* на крысах биохимическими методами.

<u>Методика эксперимента.</u> <u>Биохимические методы.</u> В работе использован принцип, основанный на концепции градиентных систем, с целью установления общей закономерности изменений в физиологическом со-

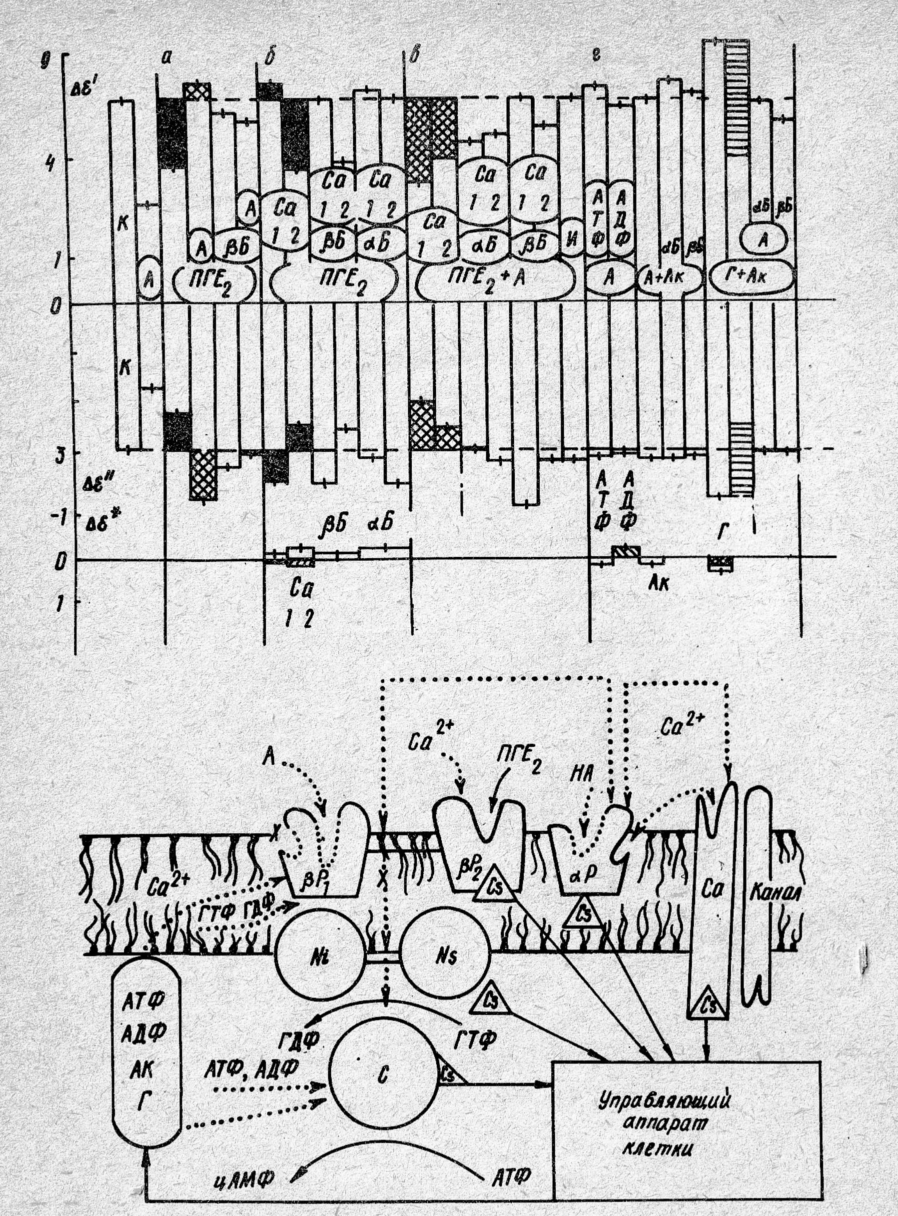


Рис.1. Диаграмма (а) воздействий $\varepsilon^*(п)$ на компоненты АЦС эритроцитов и схема (б) связей АЦС: К – контроль; А – адреналин; $\alpha Б, \beta Б$-блокаторы α-, β-рецепторов; И – изоптин; АК – аскорбиновая кислота; Г – глутатион; Ca_1, Ca_2 – добавки Ca^{2+}, отличающиеся на порядок; C_S – элементы цитоскелета; βP_1, βP_2 – β – рецептор; αP – α – рецептор; C – аденилатциклаза; пунктирные линии – связи, установленные методом СВЧ диэлектрометрии

стоянии кардиомиоцитов и эритроцитов в условиях развивающегося ишемического повреждения. На модели ишемии миокарда в условиях перегрузки кардиомиоцитов кальцием, вызываемой по Fleckanstain и Rona (1973 г.) экзогенным адреналином, у 170 крыс линии Вистар массой 160–220 г изучались особенности адренергической регуляции на разных уровнях организации. Использованы следующие показатели: содержание адреналина, норадреналина, дофамина в гипоталамусе, надпочечниках, плазме крови, эритроцитах, сердце, активность энергозависимого процесса обратного нейтронального мембранного транспорта меченого ^{3}Н–НА при работе со слайсами тканей правого и левого предсердий с использованием специфических ингибиторов нейтронального мембранного транспорта. Одновременно с исследованием адреномедиации изучали состояние липидной и белковой компоненты мембран и показатели, характеризующие состояние внутриклеточного метаболизма глюкозы. Использованы биохимические тесты: мелоновый диальдегид в микросомальной фракции миокарда, содержание гидроперекисей в эритроцитах и плазме, уровень спонтанной и инициированной хемилюминесценции и перекисной резиститности эритроцитов, активность глутатионредуктазы и глутатионпероксидазы, проницаемость для глюкозы и активность глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы. Кроме того, об изменении целостности структур кардиомиоцитов и эритроцитов судили по показателям электронномикроскопических и морфометрических исследований, а также растровой сканирующей электронной микроскопии.

СВЧ диэлектрометрия. Измерялась комплексная диэлектрическая проницаемость суспензии эритроцитов человека на СВЧ диэлектрометре, разработанном в ИРЭ АН УССР [3]. По изменению ε^* фиксировалось наличие / отсутствие ответа клеточной системы на направленное воздействие биологически активного вещества на белковые компоненты АЦС [4]. Погрешность измерений составляет 3 % по ε', ε'', погрешность измерения изменений – 1 %. Объем суспензии эритроцитов, заливаемый в кювету, не превышает 0,01 мл. Продолжительность измерения одной пробы 2–3 мин. Суспензию эритроцитов приводили к единой концентрации по показанию ФЭК (λ = 580 нм). В качестве воздействующих агентов были использованы: адреналин (А), ПГЕ$_2$, обзидан ($\beta Б$ – блокатор 0), аскорбиновая кислота (АК), глутатион (Г) – АТФ, АДФ, нитроглицерин (НГ), α – блокатор ($\alpha Б$ – дигидроэрготамин), Ca_1, Ca_2, глюкоза (Гл), инсулин (И), ε', ε'' – усл. ед.

Результаты и обсуждение. Клетку можно представить в виде белково-липидного матрикса, покрытого слоем воды. Сочетанием методов СВЧ диэлектрометрии и рентгеноструктурного анализа показано [5],

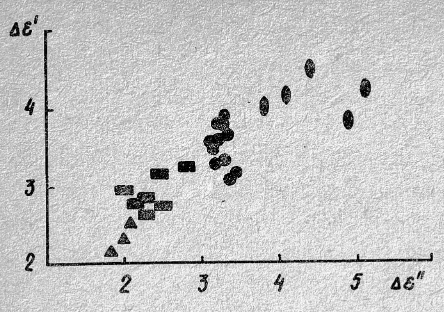


Рис.2. Отличия в ε', ε'' суспензии эритроцитов при различных видах сердечно-сосудистой патологии: ● – норма; ▬ – ГБ-II; ▲ – МГ; ● – ИБС

что организация гидратного окружения белковых макромолекул определяется его структурой, которая формируется во взаимодействии с растворителем. Изменения структуры сопровождаются изменениями гидратного окружения как на макромолекулярном, так и на тканевом уровнях. Следовательно, любое воздействие на мембранные компоненты должно сопровождаться изменением гидратного окружения взаимодействующих компонент.

На данном уровне интерпретации полученные значения комплексной диэлектрической проницаемости использованы как параметр, характеризующий только факт изменения функционального состояния мембран. Изменения на молекулярном уровне, возникшие в результате

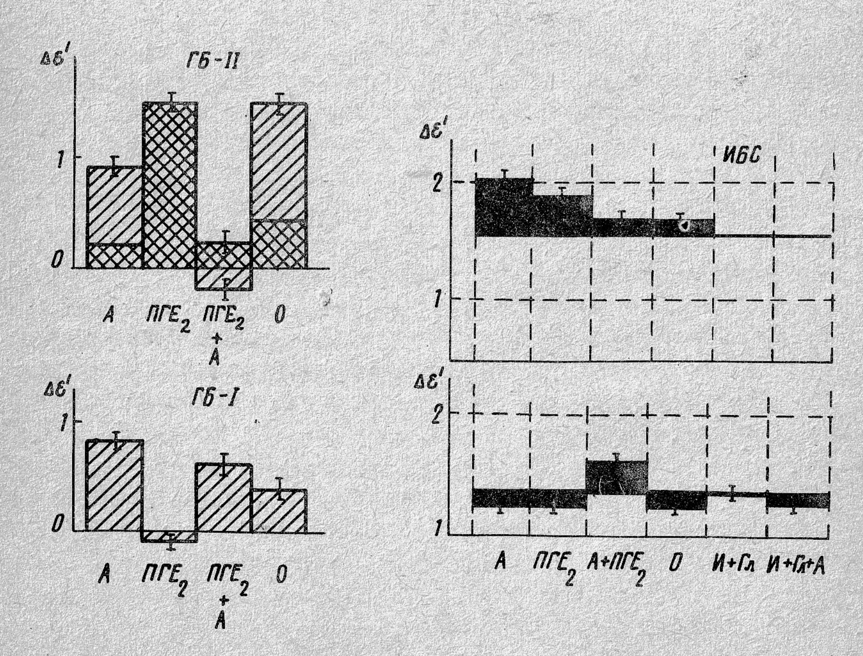


Рис.3. Отличия в клеточном ответе при различных видах сердечно-сосудистой патологии

развития сердечно-сосудистой патологии, послужили основой для создания диагностического теста по диэлектрической проницаемости суспензий форменных элементов крови лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов в СВЧ диапазоне. На рис. 2 показаны отличия в ε^* разных стадий гипертонической (ГБ) и ишемической болезней. Воздействием на молекулярные компоненты механизма, ответственного за проведение сигнала в клетку -β-рецептор, получали разные типы ответов клетки в условиях нормы и патологии (рис. 3). Они свидетельствуют о нарушении функции этого механизма рецепции – первого звена всей цепи АЦС. Можно с уверенностью утверждать, что затронута конформация самого белка рецептора, так как не работает пара регуляторов ПГЕ$_2$ и адреналина.

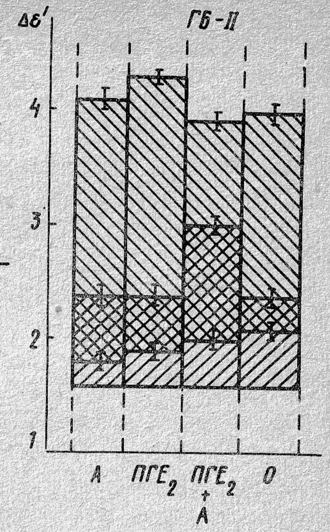


Рис.4. Индивидуальность клеточного ответа в условиях гипертонической болезни II стадии

На рис.4 показана индивидуальность клеточного ответа при воздействии на β-рецептор для гипертонической болезни II стадии. Такие индивидуальные оценки можно получить для всех видов патологии и подбора лекарственных воздействий. Эффекты отличаются амплитудой для выделенных видов патологии и по знаку для разных видов патологии при воздействии на один из регулярных центров рецептора – гормональный центр связывания ПГЕ$_2$. Суммарный эффект защиты ПГЕ$_2$ от воздействия адреналина значительно более вариабелен. Как показывают диаграммы широкого спектра воздействия, это вызвано связью с другими звеньями цепи.

Биохимическими тестами показано, что в условиях моделирования ишемического повреждения *in vivo* развиваются процессы чрезмерной активации адренергических механизмов, что выражается в повышении содержания А и НА, небольшом снижении ДОФ, активации процесса биосинтеза катехоламинов, ингибировании ключевого фермента метаболизма катехоламинов-моноаминоксидазы. Такие же нарушения зафиксированы в кардиомиоцитах и эритроцитах *in vitro*. Эти данные свидетельствуют о том, что в основе механизма повреждения клетки лежит чрезмерное моноаминергическое обеспечение клетки, которое видно на рис.

2-4 по данным СВЧ диэлектрометрии. В отличие от биохимических методов СВЧ диэлектрометрия позволяет локализовать места повреждения системы управления клетки по анализу полных диаграмм воздействия.

Итак, апробация метода СВЧ диэлектрометрии в сопоставлении с экспериментами *in vivo* и *in vitro* с применением биохимических методов показала хорошую корреляцию данных, а также возможность получения более обширной информации, высокую смысловую точность измерений. С одной стороны, стала очевидной индивидуальность реакции организма, что чрезвычайно важно в практической медицине; с другой - возможность проведения каждого эксперимента с эритроцитами одной особи или индивидуума за короткое время (время изменения одной пробы составляет ~5 мин) полностью исключает ряд существенных погрешностей за счет неидентичности клеток, и основная погрешность эксперимента сводится к погрешности СВЧ диэлектрометра. Информативность метода обусловлена его чувствительностью к изменению компонент системы, определяющих структуру и функцию мембранных комплексов. Работа с нативными клетками позволяет сделать оценки обратимости повреждений для данного индивидуума и в случае обратимости направлено подобрать факторы, восстанавливающие систему регуляции. Имеется также прямая возможность слежения и прогнозирования клинических проявлений в течение развития сердечно-сосудистой патологии.

1. Щеголева Т.Ю. СВЧ-диэлектрометрия биополимеров и клеток: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. - М., 1988. - 40 с.
2. Малая Л.Т., Щеголева Т.Ю., Бахова Л.К. Исследование методом СВЧ-диэлектрометрии параметров нативного аденилетциклазного комплекса при модуляции его активности // Биофизика. - 1988. - 33, вып. 4. - С. 629-633.
3. Щеголева Т.Ю. Измерения электрических параметров тонких образцов полидисперсных, жидких и твердых диэлектриков с большим поглощением в микроволновом диапазоне // Радиотехника и электрон. - 1981. - 26, № 1. - С. 2328-2333.
4. Щеголева Т.Ю., Бахова Л.К. Гидратация - параметр, отвечающий на структурно-функциональные изменения мембран // Биофизика. - 1986. - 31, вып. 2. - С. 358-359.
5. Щеголева Т.Ю. Гидратное окружение макромолекул биополимеров по данным СВЧ-диэлектрометрии // Там же. - 1984. - 29, вып. 6. - С. 935-939.

УДК 541.144

А.А.Сериков, Л.Н.Христофоров

ОБ ЭФФЕКТАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИСТЕМЫ

Изучение воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ диапазона на биологические объекты к настоящему времени сформировалось в одну из интереснейших областей электромагнитобиологии. Сложившейся здесь ситуации трудно дать однозначную оценку. Действительно, накопленный в последние десятилетия богатый экспериментальный материал (см., например, [1] и приведенную там библиографию) свидетельствует о существенных эффектах облучения низкоинтенсивными СВЧ полями биообъектов самого различного уровня организации; установлены и некоторые общие черты такого воздействия. Появились и успешно внедряются в клинику основанные на нем методы лечения различных патологий [2]. В то же время остается неясным, как в принципе объяснить заметное влияние полей, не обеспечивающих хотя бы местного нагрева тканей более чем на десятую долю градуса. Неясно также, на каком уровне обеспечиваются рецепция ЭМИ и первичные "чисто физические" акты его воздействия. Между тем проблема может оказаться гораздо шире, чем то диктуется ее прикладными аспектами. Подтверждаемая все новыми сообщениями универсальность воздействия слабого микроволнового излучения на биосистемы заставляет задуматься над тем, не является ли электромагнитный канал взаимодействия в соответствующем диапазоне частот фундаментальным, внутренне присущим всему живому средством передачи информации и управления.

Большинство работ, ставящих целью теоретическое осмысление эффектов биологического действия слабого ЭМИ, в том числе СВЧ биоэффектов, носят, как правило, феноменологический либо полуфеноменологический характер, используя весьма общие кооперативные, точнее говоря, синергетические модели биосистем. Многие авторы апеллируют, в частности, к известной модели Фрёлиха [3]. Однако при безусловной полезности синергетических подходов к данной проблеме сами по себе они не могут прояснить природу конкретных носителей "необычных" свойств биосистем, как и дать ответ на вопрос о первичных механизмах биологического действия ЭМИ. Для этих целей требуется, по-видимому, более детальное моделирование, учитывающее количественные характеристики рассматриваемых эффектов. Напомним в этой связи, что используемые в самых различных экспериментах по

воздействию микроволн на биообъекты мощности излучения имеют порядок ~ 1 мВт/см^2 (в ряде последних сообщений фигурируют и существенно более низкие значения, но мы пока будем ориентироваться лишь на многократно проверенные данные). Далее, фиксируемые в целом ряде опытов эффекты характеризуются острорезонансной частотной зависимостью с относительной шириной спектра действия $\lesssim 10^{-3}$-10^{-4}, а иногда и $\sim 10^{-5}$. Существенно также, что описываемые эксперименты проводились, как правило, при физиологических температурах, определяющих соответствующий уровень термодинамических флуктуаций в исследуемых системах.

Исходя из сказанного сосредоточим внимание именно на рассмотрении первичных механизмов воздействия СВЧ излучения на биосистемы. При этом нас будут интересовать процессы, протекающие в биологических макромолекулах (биополимерах), непосредственно взаимодействующих с ЭМИ. Биополимеры представляют собой нижайший специфически биологический уровень организации материи: макромолекулы нуклеиновых кислот ответственны за хранение и передачу генетической информации, высокоэффективный катализ биохимических реакций, составляющих основу жизнедеятельности организмов, обеспечивается макромолекулами ферментов, биополимеры белков формируют также каналы зарядового транспорта, пронизывающие клеточные мембраны. Характерной особенностью биополимеров является присущее всем им свойство молекулярной, в частности конформационной, изомерии. В соответствии с современными представлениями конформация биомолекул играет важнейшую роль в их функционировании. Так, процессы репликации, синтез белков сопровождаются переходом участков двойной спирали ДНК из "физиологически нормальной" В- в А-конформацию. Определенным конформациям отвечают и биохимически активные состояния ферментов. Переходы между различными конформационными состояниями биомолекул, разделенными барьерами, обычно значительными по сравнению с тепловыми энергиями кТ, происходят, как правило, с использованием энергии гидролиза АТФ - универсального источника энергии в биосистемах. Подчеркнем также, что все сказанное относится и к отдельным фрагментам биологических макромолекул - участкам спирали ДНК, активным ецентрам ферментов и т.п.

В свете отмеченного одним из возможных первичных механизмов воздействия ЭМИ на биосистемы представляется индуцирование с его помощью переходов между различными изомерическими состояниями биомолекул (применительно к ферментам эта мысль высказывалась, в частности, Фрёлихом). Поглощаемая энергия излучения в соответствии с таким представлением идет на преодоление (полное или частичное)

барьера, разделяющего конформеры. Необходимым условием осуществления данного процесса является, разумеется, электрическая активность соответствующих степеней свободы биополимеров. Определенным основанием для предлагаемой трактовки первичных механизмов применительно к экспериментам в микроволновом диапазоне служит информация о спектрах биополимеров. Так, для частот упругих деформаций глобулярных белков известна оценка [4] $\nu \sim 10^{10}$ с$^{-1}$. Проведенные, исходя из структурных данных, расчеты частот колебаний нуклеозидов ($m \approx 200 m_p$), входящих в состав двухтяжевых ДНК, при различных конформациях макромолекул приводят к величинам [5] $\omega = 2\pi\nu \sim 10^{12}$ с$^{-1}$, что согласуется также с данными спектроскопии КР.

Простейшая модель, иллюстрирующая переключение с помощью ЭМИ конформационных состояний молекулы, соответствует задаче о движении частицы в потенциальной яме $U(x)$ с двумя минимумами, разделенными барьером. Переменная сила $F(t) \equiv eE(t)$ (e - заряд частицы; $E(t)$ - напряженность электрической компоненты поля излучения) вынуждает колебания частицы, первоначально локализованной по одну из сторон барьера, с амплитудой, приближающейся к координате максимума, так что тепловые флуктуации энергии частицы становятся достаточными для непосредственного перехода ее через барьер (за время, в течение которого действует поле). Применимость классического (неквантового) описания колебаний частицы в рассматриваемом частотном диапазоне обеспечивается малостью фактора $h\nu/kT$ (для частот $\nu \sim 10^{11}$ с$^{-1}$ это величина порядка 0,01). Однако бо́льшая по сравнению с тепловыми энергиями высота барьера ($\epsilon/kT \gg 1$) позволяет избежать непосредственного введения в рассмотрение случайных сил, порождающих тепловые флуктуации движения (не слишком существенные для высокоэнергетических колебаний), ограничив учет многочастичных аспектов задачи включением силы трения. Таким образом, приходим к уравнению движения частицы

$$m(\ddot{x} + 2\lambda\dot{x}) + dU(x)/dx = F(t), \qquad (1)$$

где m - масса; λ - коэффициент затухания, характеризующий потери энергии на трение; точки обозначают дифференцирование по времени.

Как известно, наиболее эффективное возбуждение колебаний осциллятора с помощью внешней силы происходит в условиях резонанса. Эффект резонанса сохраняется, вообще говоря, и при ангармоническом потенциале (наличие барьера между ямами приводит к необходимости учета отклонений от гармонического приближения, по крайней мере, для колебаний достаточно большой амплитуды). В то же время само понятие резонансной силы (сигнала) не сводится в данном случае

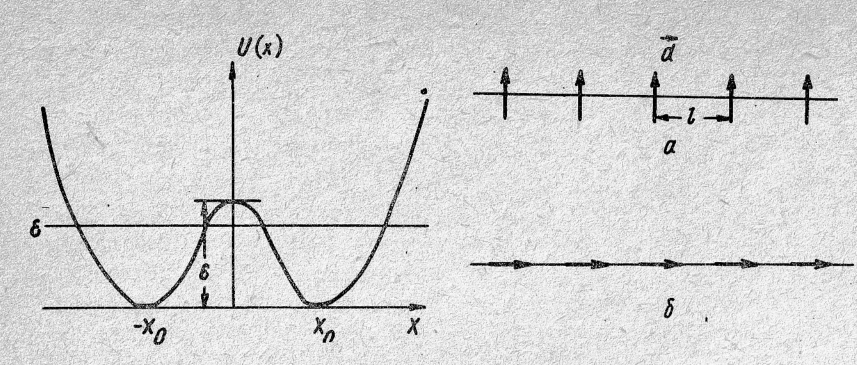


Рис.1. Представление симметричного двухъямного потенциала

Рис.2. Варианты одномерной цепочки мономеров

к совпадению частот, а требует более общей трактовки. Ниже условимся понимать под резонансной (точнее, квазирезонансной) силу, вызывающую вынужденное движение частицы, совпадающее с ее свободными колебаниями в рассматриваемой потенциальной яме. Применительно к нашему случаю свободные колебания описываются уравнением $m\ddot{x}+dU(x)/dx=0$. Подставляя частное решение этого уравнения $x=x_\varepsilon(t)$ (ε – энергия колебаний) в исходное уравнение (1), приходим к выражению $F_\varepsilon(t)=2\lambda m\dot{x}_\varepsilon(t)$ для внешней силы, вынуждающей резонансное ангармоническое движение частицы с амплитудой, соответствующей заданной величине ε. Фурье-компонента $\tilde{F}_\varepsilon(\omega)=2\lambda m\omega\tilde{x}_\varepsilon(\omega)$ определяет при этом спектральный состав резонансного сигнала; в частном случае гармонического сигнала она имеет вид δ-функции в окрестности собственной частоты осциллятора. Для симметричного двухъямного потенциала $U(x)=\epsilon(1-x^2/x_0^2)^2$ (рис. 1) собственное движение частицы в левой яме с энергией $\varepsilon=\epsilon-0$ описывается функцией $x_\epsilon(t)=-\sqrt{2}x_0\,ch^{-1}(2\sqrt{\epsilon/m}\,t/x_0)$. Спектральный состав резонансного сигнала определяется при этом выражением $\tilde{F}_\epsilon(\omega)=-\lambda m^{3/2}(2\epsilon)^{-1/2}\times x_0^2\omega\,ch^{-1}(\pi x_0\sqrt{m/\epsilon}\,\omega/4)$ и имеет (по абсолютной величине) максимум при $\omega_m\approx\frac{4,5}{\pi x_0}\sqrt{\epsilon/m}$ (что существенно ниже частоты колебаний $\omega_0=\frac{2}{x_p}\sqrt{2\epsilon/m}$ у дна ямы). Мы не останавливаемся здесь на подробном анализе спектра резонансного сигнала, особенностей переходного режима, за время которого (λ^{-1}) частица "набирает" необходимую энергию ε, и других подобных вопросах. Приведенные соображения нужны для выбора конкретного подхода к исследованию эффектов резонанса в нелинейных колебаниях. В дальнейшем нас будут в основном интересовать оценки энергетических эффектов, достижимых при возбуждении молекулярных осцилляторов, анализ которых, как правило, можно ограничить рамками гармонического приближения.

Амплитуда свободных колебаний гармонического осциллятора с потенциальной энергией $U(x)=m\omega_0^2x^2/2$, как известно, может быть выражена через его энергию в виде $x_0=\sqrt{2\varepsilon/m\omega_0^2}$. Амплитуда вынужденных колебаний данного осциллятора при действии на него резонансной силы $F(t)=eE_0\cos\omega_0 t$ представима как

$$x_0=eE_0/2\lambda m\omega_0. \qquad (2)$$

Приравнивая оба эти выражения для x_0, представляем амплитуду напряженности электрического поля E_0 как функцию энергии вынужденных колебаний: $E_0=2\sqrt{2m\varepsilon}\,\omega_0\lambda/e$. Это выражение можно также переписать в виде $E_0=2E_c q/\pi$, где $E_c=\sqrt{2m\varepsilon}\,\omega_0/2e$ – напряженность постоянного поля, необходимая для перемещения частицы в точку x_0 или, что то же самое, для сообщения ей энергии ε; $q\equiv\lambda/\nu_0\equiv 2\pi\lambda/\omega_0$ – логарифмический декремент затухания (обратное значение добротности осциллятора).

Подставляя в полученные выражения характерные для локальных колебаний биомолекул в микроволновом диапазоне значения

$$\omega_0=10^{12}c^{-1}, \quad m=200\,m_p; \quad e=e^- \qquad (3)$$

и полагая $\varepsilon=10kT$ (что достаточно много по сравнению с энергией тепловых колебаний и в то же время сравнимо с энергией гидролиза АТФ, обеспечивающей конформационные переходы при функционировании биомолекул), получаем, в частности, значение напряженности постоянного поля $E_c\approx 5\cdot10^6$ В/см, близкое к величинам внутримолекулярных полей. При этом для достижения энергии ε с помощью резонансного переменного поля с амплитудой напряженности $E_0\sim 1$ В/см, что отвечает упомянутой выше мощности источника ЭМИ ~ 1 мВт/см^2, требуется значение $q\sim 3\cdot10^{-7}$. Соответствующая добротность не характерна даже для спектральных линий атомов. Таким образом, взаимодействие излучения с отдельно взятыми локальными колебаниями биомолекул не может служить достаточно эффективным первичным механизмом, обеспечивающим экспериментально наблюдаемое биологическое действие СВЧ полей.

Поиски более эффективных механизмов взаимодействия биологических молекул с ЭМИ должны основываться на моделях, явным образом учитывающих их макромолекулярную природу. Ниже рассмотрены некоторые такие модели.

1. Антенный эффект. Как известно, функционирование ряда биологических макромолекул, в частности ферментов, во многом определяется процессами, протекающими в их активных центрах, окруженных биополимерными цепочками, часто свернутыми в глобулы. Исходя из

такого представления о структуре биомолекулы, резонно предположить, что взаимодействие с полем излучения приводит к возбуждению дипольно-активных колебаний мономеров, формирующих указанную цепочку, а те, в свою очередь, индуцируют колебания в активном центре, способные привести к переходу его в другое конформационное состояние. Подобный эффект антенны реализуется, как известно, в фотосинтетических системах (фотосинтетическая единица включает в себя светособирающую антенну и связанный с ней фотореакционный центр).

В качестве простейшей модели для иллюстрации антенного эффекта рассмотрим одномерную цепочку мономеров, варианты которой изображены на рис.2. Предположим, что характеризуемые координатами x_n локальные дипольно-активные колебания каждого из мономеров имеют одинаковую собственную частоту Ω, затухание λ и связаны взаимодействием через электрическое поле дипольных моментов $d_n \equiv e x_n$ (в рассматриваемом случае одномерной структуры можно ограничиться учетом взаимодействия лишь соседних диполей). Пусть, далее, определенный ($n = 0$) мономер аналогичным образом взаимодействует с выделенным осциллятором (припишем ему координату y и параметры $\tilde{\Omega}$, $\tilde{\lambda}$), характеризующим колебания в активном центре макромолекулы. Уравнения движения для координат x_n, y при действии внешнего однородного монохроматического поля приближенно представимы в виде

$$\begin{cases} \ddot{x}_n + \Omega^2 x_n + 2\lambda \dot{x}_n + \bar{\omega}^2 (x_{n-1} + x_{n+1}) + \delta_{n0} \bar{\bar{\omega}} y^2 = \frac{eE_A}{m} \cos \omega t, \\ \ddot{y} + \tilde{\Omega}^2 y + 2\lambda \dot{y} + \bar{\bar{\omega}}^2 x_0 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Характеризующий взаимодействие диполей параметр $\bar{\omega}^2$ для структуры, представленной на рис. 2,а, определяется выражением $\bar{\omega}^2 = e^2/ml^3$, где l - расстояние между центрами соседних мономеров; аналогично задается и параметр $\bar{\bar{\omega}}^2$. Максимальная амплитуда колебаний осциллятора y, отвечающая случаю резонанса $\omega^2 = \tilde{\Omega}^2 = \Omega^2 + 2\bar{\omega}^2$, оказывается равной $Y_0 = eE_A \bar{\bar{\omega}}^2 / 4m\lambda\tilde{\lambda}\tilde{\Omega}^2 = y_0 \tilde{\omega}^2 / 2\tilde{\lambda}\tilde{\Omega}$, где y_0 - значение амплитуды колебаний при непосредственном действии излучения на осциллятор y (с точностью до обозначений величина y_0 определяется формулой (2)). Соответственно для достижения той же амплитуды (и энергии) колебаний y по механизму антенны требуется резонансное поле с амплитудой $E_A = (\tilde{\Omega}/\bar{\omega})^2 E_0 \tilde{q} / \pi$, где E_0 - амплитуда поля, непосредственно действующего на осциллятор; $\tilde{q}$ - логарифмический декремент затухания колебания y. Согласно проведенному выше рассмотрению, можно также записать $E_A = 2(\tilde{\Omega}/\bar{\bar{\omega}})^2 E_c \tilde{q}^2 / \pi^2$, где E_c - напряженность "равноэффективного" постоянного поля.

При значениях (3) и l порядка нескольких ангстрем оценка величин $\bar{\omega}$, $\bar{\bar{\omega}}$ приводит к значениям в области сотен гигагерц, т.е. также принадлежит микроволновому диапазону. К тому же результату приводит и подстановка значений $e \sim 0{,}1e$, $m \sim m_p$, характерных для водородных связей, цепочки которых также типичны для биомолекулярных структур. Таким образом, антенный механизм в принципе можно использовать для рассмотрения взаимодействия биомолекул с СВЧ полями. Полагая для простоты $\tilde{\Omega} \approx \bar{\bar{\omega}}$ и используя полученное выше значение $E_c = 5 \times 10^6$ В/см, находим, что требуемому значению $E_A \sim 1$ В/см отвечает декремент затухания $\tilde{q} \sim 3 \cdot 10^{-3}$. Эту оценку можно улучшить, рассматривая взаимодействие выделенного колебания с двухмерной либо трехмерной антенной дипольно-активных осцилляторов. С учетом особенностей диполь-дипольного взаимодействия оба этих типа антенны позволяют уменьшить требуемые значения $\tilde{q}$ примерно на порядок по сравнению с одномерным случаем (конкретные значения размерного фактора зависит от типа упаковки мономеров в антенне).

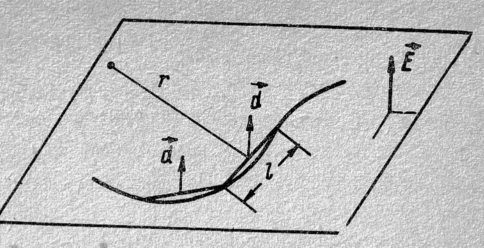


Рис.3. Представление биомолекулярной цепочки в виде длинной нити

2. Полеиндуцированное разворачивание биополимера. Возбуждение в отдельных группах (мономерах) биополимера дипольных осцилляций может обусловить влияние ЭМИ на форму макромолекулы. В простейшем варианте биомолекулярную цепочку можно рассматривать как длинную нить с изгибной жесткостью a и кривизной $\rho = r^{-1}$ (на рис.3 для простоты молекула "уложена" в плоскость), так что плотность свободной энергии для малых ρ имеет вид $\Phi = \Phi_0 + a\rho^2/2$. Исходя из выражения $W \sim e^{-\Delta\Phi/T}$ для вероятности флуктуаций, "скручивающих" молекулярную нить, для среднего квадрата расстояния между удаленными друг от друга точками молекулы можно получить выражение [6]

$$\overline{R^2} = 2(a/kT)^2 (LkT/a) - 1 + e^{-LkT/a}),$$

где L - расстояние, отмеренное вдоль нити. Таким образом, переход от линейной формы молекулы ($\overline{R^2} \sim L^2$) к клубку ($\overline{R^2}/L^2 \to 0$) определяется отношением LkT/a.

Пусть теперь под действием ЭМИ в мономерах молекулярной цепи возбуждаются дипольно-активные колебания, перпендикулярные плоскости упаковки. Отталкивание соседних диполей приведет при этом к

увеличению жесткости нити на величину $\Delta a = 3e^2 x_0^2 / 4l^2$, где x_0 определяется формулой (2). Из условия $\Delta a \gtrsim LkT$ получаем значение амплитуды напряженности $E_0 > \frac{2m\omega_0^2 q}{\pi e^2}\sqrt{\frac{NkTl^3}{3}}\,(N=\frac{4}{l})$, при которой указанное изменение жесткости существенно сказывается на форме макромолекулы. Подставляя численные значения (3) и l = 4 Å, E_0 = 1 В/см, N = 100, определяем необходимое для эффекта значение декремента затухания $\lesssim 3\cdot 10^{-6}$.

<u>3. Влияние ЭМИ на зарядовый транспорт.</u> Известно, что эффективность работы биологических транспортных систем во многом обеспечивается именно полимерными свойствами биомолекул. Рассмотрим простейшую модель трансмембранного ионного канала, предполагая, что стенки его образованы спиральным биополимером (белком), а движение ионов происходит под действием мембранной разности потенциалов, определяющей напряженность (постоянного) поля E_m (рис. 4). Разумеется, реальный ионный канал и движение ионов в нем намного сложнее. Предложенная модель позволяет, однако, оценить возможности управления транспортом заряда через мембрану с помощью слабого микроволнового ЭМИ при весьма значительных напряженностях E_m. Конкретно выясним условия, при которых индуцированные излучением дипольно-активные осцилляции в звеньях биополимерной цепи порождают поле E_{ind}, способное "закрыть" канал (здесь уместна аналогия между макромолекулой белка и управляющей сеткой в триоде). Схема расчета эффекта ясна из рис.5 и сводится к сложению полей, действующих на переносимый ион со стороны (характеризующихся разными подвижностями) зарядовых компонент индуцированных диполей. Усреднение по периоду колебаний приводит к отличной от нуля постоянной составляющей напряженности $\langle E_{ind} \rangle$, вклад в которую дают все диполи белковой спирали. Опустив несколько громоздкие промежуточные выражения, выпишем здесь результат расчета максимального (по длине канала) значения $\langle E_{ind} \rangle_{max} = 3ex_0^2 / 2R^4$ (численные коэффициенты, впрочем, несколько варьируются в зависимости от ориентации относительно оси канала напряженности $\vec{E}$ электрической компоненты ЭМИ), где R – радиус канала, а амплитуда колебаний x_0 определяется формулой (2). Приравнивая значения $\langle E_{ind} \rangle_{max}$ и E_m, получаем выражение $E_0 = \sqrt{2E_m / 3e^3}\, m\omega_0^2 R^2 q / \pi$ для амплитуды напряженности СВЧ поля, обеспечивающего "запирание" канала. При использовании значений (3), полагая также R = 3 Å, $E_m = 10^5$ В/см (типичная напряженность поля в биологических мембранах), находим необходимое для эффекта значение декремента затухания $q \sim 3\cdot 10^{-5}$.

Поиски эффективных механизмов взаимодействия биомолекул с микроволновым ЭМИ, видимо, могут быть продолжены и на других моделях.

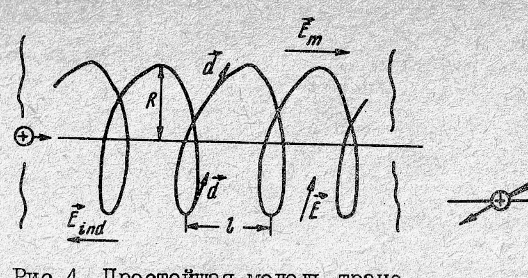



Рис.4. Простейшая модель трансмембранного ионного канала

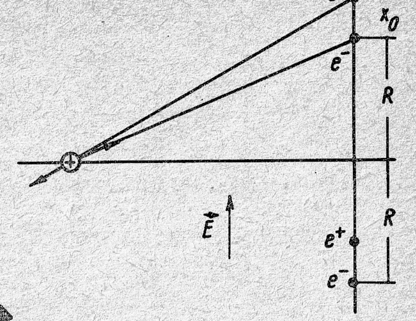


Рис.5. Схема расчета порожденного поля E_{ind}

Представляется, однако, маловероятным, что при этом удастся сколько-нибудь значительно понизить необходимые для эффекта добротности молекулярных осцилляторов по сравнению с найденными выше значениями $\gtrsim 10^3 - 10^4$. Но именно такие добротности характерны для резонансов экспериментально наблюдаемых спектров действия СВЧ полей на биообъекты. Это относится, в частности, к экспериментам на дрожжах [7]. В едва ли не единственном сообщении [8] об опытах на молекулярном объекте (Нв) названа величина, близкая к 10^5. Столь слабая релаксация колебаний при физиологических температурах в области частот, соответствующей достаточно сильному поглощению среды, требует тем не менее специального объяснения. Выскажем здесь определенные соображения, наиболее уместные, по-видимому, применительно к колебаниям в активных центрах глобулярных белков.

Полученные в последние годы различными методами данные по динамике биомолекул свидетельствуют о растущей от центра глобулы к периферии подвижности молекулярных групп. Исходя из этого факта можно предположить, что периферийные субъединицы с их расторможенными поступательными степенями свободы (о чем и свидетельствуют высокие подвижности) испытывают непосредственное влияние растворителя, в частности воды, обладающего достаточно высокой плотностью состояний в интересующей нас области частот (обеспечивающей интенсивное поглощение), поэтому колебания, индуцированные в них СВЧ полями, должны характеризоваться значительным затуханием. Напротив, затухание осцилляций в плотноупакованных (низкие подвижности) молекулярных группах, близких к центру глобулы, обязано лишь их взаимодействию с себе подобным окружением, не обладающим высокой плотностью состояний в микроволновом диапазоне. Следствием такой "архитектуры" биомолекулярной глобулы должно явиться установление в

ней иерархии возрастающих от периферии к центру добротностей СВЧ колебаний. По отношению к центральным участкам можно по существу говорить лишь об опосредованном затухании осцилляций, слабую эффективность которого иллюстрирует простейший пример.

Рассмотрим систему двух слабо связанных резонансных по отношению друг к другу осцилляторов, один из которых характеризуется заданным затуханием, играя по отношению ко второму роль термостата. Уравнения движения такой системы имеют вид

$$\ddot{x}_1 + \Omega^2 x_1 + 2\lambda_1 \dot{x}_1 + \bar{\omega}^2 x_2 = \ldots; \quad \ddot{x}_2 + \Omega^2 x_2 + \bar{\omega}^2 x_1 = \ldots$$

Правые части могут включать произвольные внешние воздействия; в секулярном же уравнении учет взаимодействия $\bar{\omega} \ll \Omega, \lambda_1$ приводит к отличной от нуля мнимой добавки к частоте осциллятора x_2, равной $Im\,\Delta\omega \equiv 2\tilde{\lambda}_2 = \bar{\omega}^4 / 4\Omega^2\lambda_1$. В силу указанного неравенства "индуцированное" затухание, однако, мало: $\tilde{\lambda}_2 / \lambda_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{\bar{\omega}^2}{2\lambda_1\Omega}\right) \ll 1$.

В заключение отметим также, что при характерных для экспериментов по СВЧ биоэффекту длительных временах экспозиции (минуты и даже часы) энергия, которую необходимо передать от ЭМИ на молекулярные колебания для преодоления барьера между различными конформационными состояниями, реально может оказаться значительно ниже, чем его высота (принятая нами $\sim$ 10 кТ), что в принципе позволило бы ослабить требования к добротности исследуемых резонансов.

Настоящая работа выполнена по программе ВК "Отклик".

1. Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. – М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1985. – 284 м.
2. Физические основы микроволновой (биорезонансной) коррекции физиологического состояния организма человека / Е.А. Андреев, М.У.Белый, В.А.Куценок и др. // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. – М., 1985. – С. 58-85.
3. Fröhlich H. Bose-condensation of strongly excited longitudinal electric modes // Phys Lett.A. – 1968. – 26, N 6. – P.402-403.
4. Чернавский Д.С., Хургин Ю.И., Шноль С.Э. Об упругих деформациях белка-фермента // Молекуляр. биология. – 1967. – 1, № 3. – С. 419-424.
5. Волков С.Н., Косевич А.М. О конформационных колебаниях ДНК // Там же. – 1987. – 21, № 3. – С. 797-806.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. – М.: Наука, 1964. – 567 с.
7. Grundler W., Keilmann F. Sharp resonances in yeast growth prove nonthermal sensitivity to microwaves // Phys. Rev. Lett.- 1983. – 51, N 13. – P. 1214-1216.
8. Диденко Н.П., Зеленцов В.И., Ча В.А. О конформационных изменениях биомолекул при взаимодействии с электромагнитным излучением // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. – М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1983. – С. 63- 77.

УДК 621.317

К.В.Ворсуль, Т.А.Смирнова, Н.Т.Черпак

ЭПР – СПЕКТРОМЕТР ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН 4–1,5 мм

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) является одним из наиболее эффективных методов исследования вещества. Информативность метода существенно возрастает с укорочением длины волны. В настоящее время метод ЭПР широко применяется во многих областях физики, химии, биологии и медицины.

При изучении мазерных характеристик активных кристаллов обычно использовались резонаторные системы [1]. Однако для исследования спектров ЭПР в миллиметровом диапазоне (ММД) удобно использовать режим бегущей волны (БВ) при взаимодействии СВЧ поля с парамагнитным кристаллом [2]. Это обусловлено рядом причин [3]:

с укорочением длины волны λ сигнала при прочих равных условиях возрастает чувствительность спектрометра как λ^{-k}, где $k>1$;

появляется возможность измерений в широком частотном диапазоне, при этом не требуется настраивать собственную частоту и коэффициент связи резонатора с линией, что важно при работе с низкими температурами;

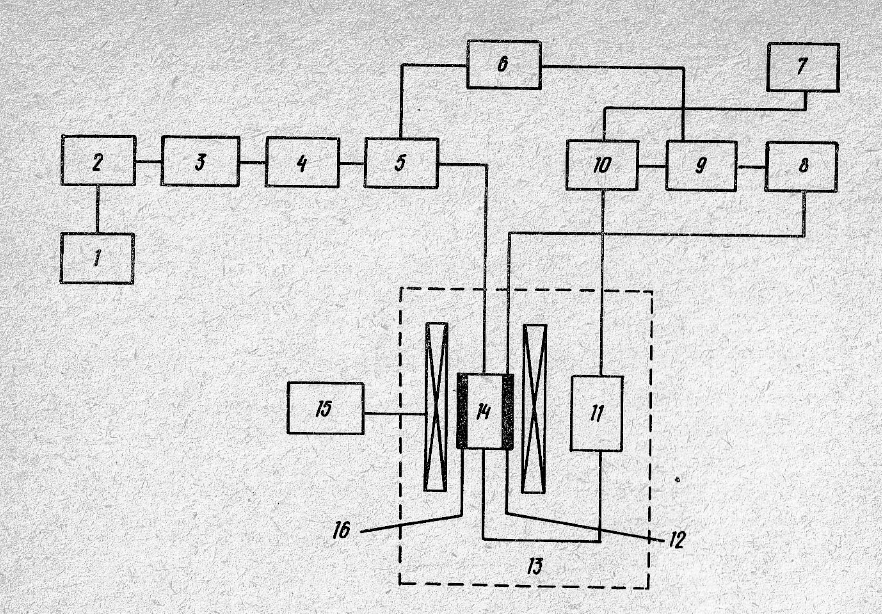
волноводная секция конструктивно проще, чем резонатор; также проще анализ результатов.

На практике режим БВ использовался для исследования мазерных характеристик ряда кристаллов в ММД: андалузита с ионами Fe^{3+} [3, 4], вольфромата магния с ионами Cr^{3+} [5] и др.

В данной работе представлен спектрометр ММД, предназначенный для исследования ЭПР спектров кристаллов в широком диапазоне частот (λ = 4–1,5 мм) в магнитных полях до 30кЭ, в интервале температур Т = 1,7–10 К.

В спектрометре (рис.1) источником сигнала 2 служит лампа обратной волны (λ= 4–3 мм) или генератор дифракционного излучения (λ = 2,6–1,5 мм), обеспечивающий высокую стабильность по частоте ($\sim 10^{-5}$) и уровню мощности излучения ($\sim$10 %) [6]. Достаточно высокая чувствительность спектрометра достигалась применением синхронного детектора 9 с модуляцией сигнала по мощности широкополосным p-i-n модулятором и использованием в качестве приемника СВЧ излучения охлажденного кристалла n-$InSb$, расположенного в криостате 13. Оценка чувствительности дает значение 10^{14} спин/Э.

Магнитное поле напряженностью до 30 кЭ создавалось сверхпроводящим соленоидом с ферромагнитным экраном [7]. Однородность магнитного поля $\Delta H/H$ при Н = 25 кЭ на длине 10 мм не хуже $2\cdot 10^{-4}$



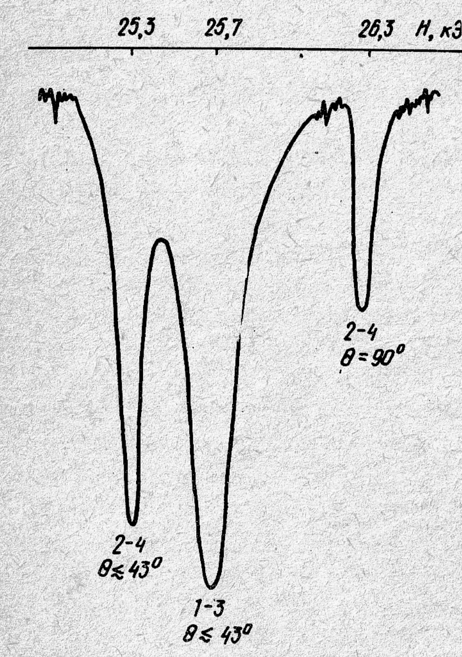


Рис.1. Блок-схема спектрометра: 1 – блок питания; 2 – аттенюатор; 4 – волномер; 6 – звуковой генератор; 7 – осциллограф; 8 – самописец; 9 – синхронный детектор; 10 – узкополосный усилитель; 11 – детектор; 13 – криостат; 14 – волноводная секция; 15 – блок питания СП магнита; 16 – датчик температуры

Рис.2. Запись линий ЭПР в андалузите

(характерный размер исследуемых образцов 3x0,5x0,8 мм^3). Значение напряженности магнитного поля определялось с помощью датчика Холла 12 с погрешностью не более 2 % (при Н = 20 кЭ).

Спектрометр использовался для измерения значения парамагнитного поглощения и ширины линии ЭПР в андалузите с ионами Fe^{3+}, а также, будучи дополненным схемой подачи мощности накачки, – для исследования инверсионных характеристик этого кристалла [8, 9]. Измерение мазерных характеристик вещества волноводным методом проводилось в секции, представляющей прямоугольный волновод пониженного сечения 0,9 x 0,5 мм^2. Наличие двух согласующих лейкосапфировых клиньев исключало влияние регенеративного эффекта на точность измерений и позволяло обеспечить КСВ не хуже 1,2.

На рис.2 приведена запись линий парамагнитного поглощения, соответствующих междублетным переходам 1–3, 2–4 в спин-системе ионов Fe^{3+} в андалузите на частоте 200 ГГц при Т = 4,2 К.

1. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. – М.: Мир, 1970. – 100 с.
2. Siegman A.E. Quantum Electronics / A.Simp. – New York : Columbia Univ. Press, 1960. – P. 597.
3. Мышенко В.В., Черпак Н.Т. Измерение магнитной восприимчивости кристаллов в волноводе: Тез. докл. IV Всесоюз. конф. (Новосибирск, 1979). – Новосибирск: СНИИМ, 1979. – С. 176–178.
4. Копылов А.А., Мышенко В.В., Песковацкий С.А., Шульга В.М. Мазерные характеристики андалузита с трехвалентным железом на частотах 75–115 ГГц // Укр. физ. журн. – 1985. – 30, № 6. – С. 856–858.
5. Черпак Н.Т. Квантовые усилители миллиметрового диапазона длин волн // Изв. вузов. Радиофизика. – 1984. – 27, № 7.–С.815–851.
6. Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. – Харьков : Вища шк., 1976. – 232 с.
7. Smirnova T.A., Stetsenko A.I., Shamfrov Ya.L: A superconducting magnet with shield for fields up to 30 koe // Cryogenics.- 1977. – 17, N4. – P. 244-246.
8. Ворсуль К.В.,Смирнова Т.А.,Черпак Н.Т.Андалузит как активное вещество для квантовых усилителей бегущей волны в 3-мм диапазоне//Изв.вузов.Радиофизика.–1986.–29,№7.–С. 838–844.
9. Ворсуль К.В., Смирнова Т.А., Черпак Н.Т. Трехуровневая схема в андалузите для 3-мм диапазона // Письма в ЖТФ. – 1987. – 13, № 2. – С. 78–80.

УДК 57.043

В.Д.Бобрышев, А.С.Снурников, В.Б.Швед

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗОГРЕВ КРИОКОНСЕРВИРОВАННЫХ КЛЕТОЧНЫХ СУСПЕНЗИЙ В САНТИМЕТРОВОМ И МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ

Диэлектрический разогрев применительно к задачам криобиологии имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционным способом размораживания, основанном на передаче энергии от внешнего теплоносителя. Он позволяет реализовать объемное тепловыделение и широкий диапазон скоростей изменения температуры. При этом управление режимом разогрева осуществляется на уровне регулирования выходной мощности СВЧ генератора, что обеспечивает простоту и безынерционность процесса. Тем не менее в практике криобиологии диэлектрический разогрев до сих пор широко не применяется, что обус-

ловливается в первую очередь жесткими требованиями к однородности и изотропности объекта, при невыполнении которых возможны значительные локальные перегревы.

В настоящей работе на основе математической модели, описывающей процесс диэлектрического разогрева в системе, состоящей из ледяной матрицы и жидких сферических включений переохлажденной пресной и морской воды, исследована зависимость температуры локального перегрева от частоты электромагнитного поля. Использованная в качестве модели двухфазная гетерогенная система по теплофизическим и электрофизическим характеристикам адекватна реальной системе – замороженной клеточной суспензии. Процесс диэлектрического разогрева принятой модели описывается следующей системой уравнений [1]:

$$\Delta\theta = \frac{R^2 E_0^2\, \omega \varepsilon_2'' \varepsilon_0}{2\lambda_2}\left[A1\cos^2 Q + B1 + D1\left(\frac{R_0}{R}\right)^2\right],$$

$$A1 = \frac{\lambda_2 (k_1 - k_3)}{2\lambda_1 + 3\lambda_2},$$

$$A2 = \frac{(\lambda_2 + 2\lambda_1)\, k_3 + 2k_1\, (\lambda_1 - 2\lambda_2)}{2\lambda_1 + 3\lambda_2},$$

$$B1 = \frac{1}{3}\left[\frac{\lambda_2 \varepsilon_1''}{\lambda_1 \varepsilon_2''} k_2 + A2 - \frac{\lambda_2\, C1}{\lambda_1\, C2}\right], \qquad (1)$$

$$D1 = \frac{1}{3}\left[\frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_2''} k_2 - \frac{C1}{C2}\right]\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + 2\right) + k_1,$$

$$k_1 = \frac{(\varepsilon_2' - \varepsilon_1')^2 + (\varepsilon_2'' - \varepsilon_1'')^2}{(\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2')^2 + (\varepsilon_1'' + 2\varepsilon_2'')^2},$$

$$k_2 = \frac{9\left[(\varepsilon_2')^2 + (\varepsilon_2'')^2\right]}{(\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2')^2 + (\varepsilon_1'' + 2\varepsilon_2'')^2},$$

$$k_3 = \frac{(\varepsilon_2' - \varepsilon_1')(\varepsilon_1' + 2\varepsilon_2') + (\varepsilon_2'' - \varepsilon_1'')(\varepsilon_1'' + 2\varepsilon_2'')}{(\varepsilon_1' + 2\varepsilon_1')^2 + (\varepsilon_1'' + 2\varepsilon_2'')^2},$$

где $\Delta\theta$ – превышение температуры относительно бесконечно удаленной точки; E_0 – напряженность электромагнитного поля; ω – циклическая частота ЭМП; R_0 – радиус сферической неоднородности; R, Q – элементы сферической системы координат (при этом принято, что вектор E_0 направлен по оси $Q = 0$, а центр неоднородности находится в точке $R = 0$); $C1, C2$ – теплоемкости жидкой и твердой фаз;

λ_1, λ_2 – теплопроводности жидкой и твердой фаз; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ε_1', ε_2' – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости жидкой и твердой фаз; ε_1'', ε_2'' – мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости жидкой и твердой фаз.

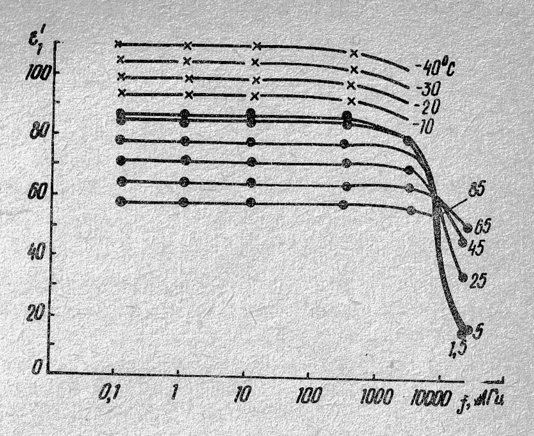


Рис.1. Частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости ε_1' воды при различных температурах: ● – литературные данные; x – аппроксимация

Наибольший практический интерес представляют исследования зависимости локального перегрева от частоты ЭМИ в температурном диапазоне 0 ÷ −40 °С, где возможно существование двухфазной системы. Анализ системы уравнений (1) показывает, что в качестве исходного материала используются теплофизические C, λ и электрофизические ε', ε'' параметры твердой и жидкой фаз. Если первые слабо зависят от температуры в указанном диапазоне и не зависят от частоты ЭМП, то значения вторых могут изменяться на несколько порядков.

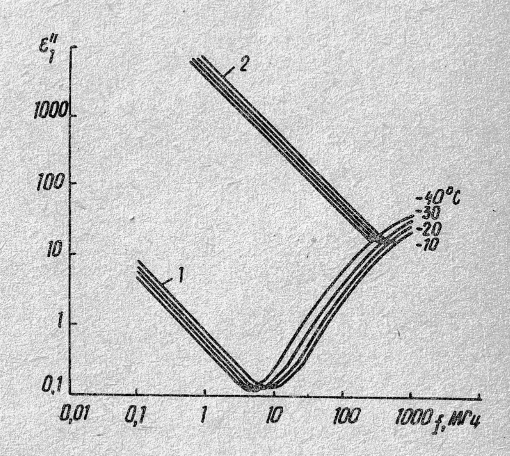


Рис.2. Частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости $\sqrt{\varepsilon_1''}$ воды при различных температурах: 1 – для пресной; 2 – для морской воды

Нами обобщены разрозненные экспериментальные данные по электрофизическим характеристикам пресной, морской воды и льда [2-4] и полученные данные аппроксимированы в диапазон 1 ÷ 10000 МГц для следующего ряда температур: −10, −20, −30, −40 °С. На рис.1-4 представлены полученные частотные зависимости для воды и льда.

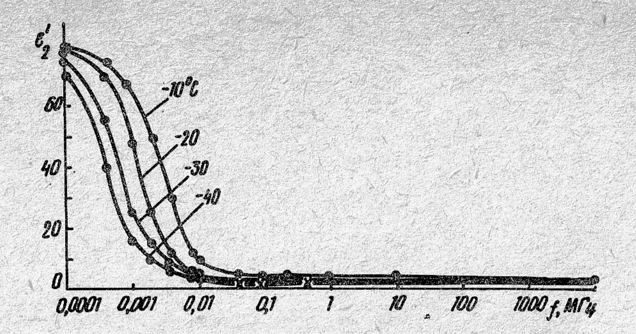


Рис.3. Частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости ε_2' льда при различных температурах: ●, х – см.рис.1

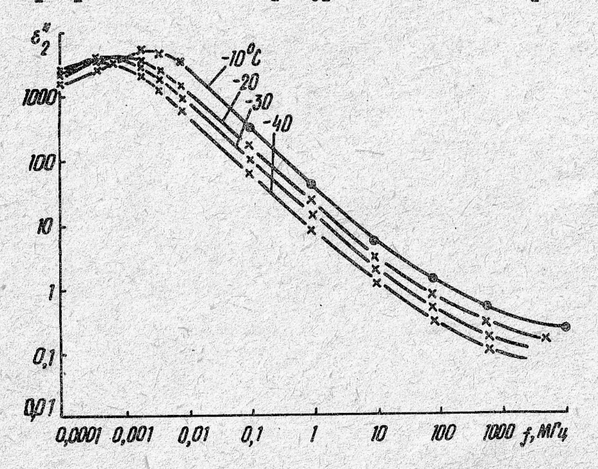


Рис.4. Частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости ε_2'' льда при различных температурах: ●, х – см. рис. 1

На основании этих электрофизических характеристик вычислены значения $\Delta\theta$ в исследуемой модели криоконсервированной клеточной суспензии при её диэлектрическом нагреве. Расчет проведен для скорости нагрева ледяной матрицы 1 °С/с, что позволило с помощью известного преобразования

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\omega\varepsilon'\varepsilon_0\, tg\,\delta}{C2}\, E_0^2$$

избежать вычисления в явном виде напряженности электрического поля E_0. Значения перегрева $\Delta\theta$ для включений морской и пресной воды в частотном диапазоне 1÷1000 МГц при разных температурах представлены на рис.5. Полученные результаты подтверждают наличие значительных локальных перегревов при диэлектрическом разогреве криобиологических систем электромагнитным полем сантиметрового диапазона. Существенное различие значений $\Delta\theta$ для пресной и морской воды на частотах до 200 МГц обусловлено доминирующим вкладом в ε'' потерь, возникающих в морской воде за счет высокой ионной проводимости. Но уже на частотах выше 1000 МГц этим различием можно пренебречь.

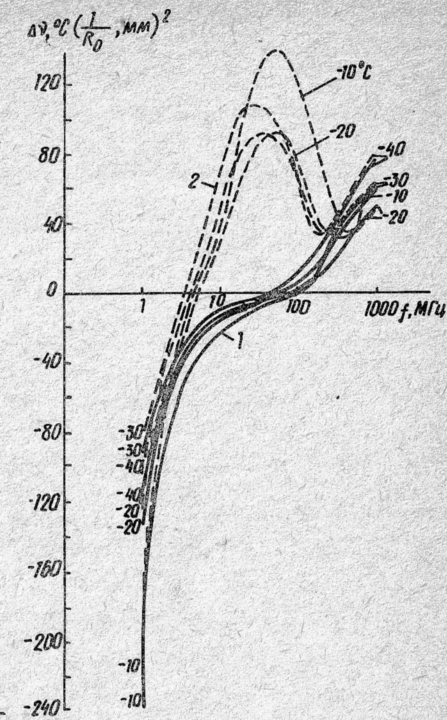


Рис.5. Температурный перепад в сферической неоднородности относительно окружающей матрицы при диэлектрическом разогреве со скоростью 1 °С/с на разных частотах: 1,2 – см. рис.2

Из анализа системы уравнений (1) и характера изменения электрофизических параметров на частотах выше 1000 МГц следует, что вплоть до частот, при которых выполняется условие $\omega\tau_D = 1$ (τ_D – дебаевское время диэлектрической релаксации для воды), значения локального перегрева будут монотонно возрастать и достигнут максимума на частоте, когда выполняется равенство (1). Поскольку τ_D монотонно увеличивается при снижении температуры и составляет $1{,}87\cdot10^{-11}$ с при 0 °С ($2{,}75\cdot10^{-11}$ с при -10 °С) [4], то максимального значения локальный перегрев достигнет на частоте до 50 ГГц. Дальнейшее повышение частоты приводит к уменьшению значений локального перегрева. При выполнении условия $\omega\tau_D \gg 1$ электрофизические характеристики воды приближаются к таковым для льда. В предельном случае система уравнений (1) имеет вид

$$\Delta\theta = R^2\frac{C2}{2\lambda_2}\frac{\partial\theta}{\partial t}\left[\frac{1}{3}\left(\frac{R_0}{R}\right)^2\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}+2\right)\left(1-\frac{C1}{C2}\right)-\frac{1}{3}\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}-\frac{\lambda_2 C1}{\lambda_1 C2}\right)\right].$$

Таким образом, с ростом частоты выше 50 ГГц значения локального перегрева асимптотически приближаются к уровню, определяемому

теплофизическими характеристиками воды и льда и составляющему ~ 1 °С при скорости нагрева ледяной матрицы 1 °С/с.

Полученный результат мог бы быть весьма ценным в криобиологии, поскольку локальный перегрев в несколько градусов является вполне приемлемым. Однако практическая полезность этого результата снижается, так как в данном частотном диапазоне глубина проникновения электромагнитного поля составляет доли миллиметра.

1. Нетушил А.В. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 500 с.
2. Никольский В.В. Электродинамика и распространение волн. - М.: Наука, 1973. - 460 с.
3. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. - М.: Высш. шк., 1959. - 400 с.
4. Вода и водные растворы при температурах ниже 0 °С / Под ред. Ф.Франкса. - Киев: Наук.думка, 1985. - 300 с.

УДК 530.1:534.2:577.3

Ю.Б.Гайдидей

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВИБРОННО ВОЗБУЖДЕННЫХ БИОПОЛИМЕРОВ С ВНЕШНИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

1. Введение. Проблема транспорта и хранения энергии в биологических системах - одна из центральных в биоэнергетике. Как известно, основным источником энергии, обеспечивающим функционирование организма, является реакция гидролиза аденозинтрифосфата (АТФ), в результате которой выделяется энергия около 0,43 эВ. Вероятно, энергия гидролиза запасается в виде колебательного возбуждения АТФ, которая за время, малое по сравнению со временем жизни колебания ($\sim 10^{-7}$ с), передается на белковые молекулы, где, как предложил в работе [1] А.С.Давыдов, возбуждаются колебания Амид 1 (колебания связи С-О с частотой 1650 см$^{-1}$) пептидной группы *HNCO*. Эту энергию можно использовать в биологических процессах лишь в том случае, если она будет запасена в виде компактного образования, чтобы в нужном месте и в определенный момент времени возбудить ту или иную связь и инициировать, например, требуемую химическую реакцию. А.С.Давыдов показал [1], что энергия может эффективно запасаться и трансформироваться в виде солитонов: нелинейных волновых пакетов, обязанных своим происхождением взаимодействию внутримолекулярных возбуждений с решеточными фононами [2]. Интересно, что приблизительно в то же время, когда была высказана идея о биологической значимости солитонов, Мак Клэр [3], исходя из термодинамических соображений, пришел к выводу, что энергию колебательного возбуждения следует запасать в виде эксимера: связанного состояния возбужденной молекулы. Никакими расчетами, правда, Мак Клэр не подтвердил свои соображения.

В последние годы идея о солитоне как о переносчике энергии в биосистемах приобрела популярность (см., например, монографию [4]). Были исследованы вопросы об устойчивости этих образований при действии на них внешних сил [2], проанализирована их чувствительность к изменениям температуры [4-6]. Влияние внешних электромагнитных полей на самосогласованные состояния внутримолекулярных возбуждений с акустическими колебаниями молекулярных систем изучалось в работах [7, 8].

Были выполнены эксперименты по комбинационному рассеянию света кристаллическими ацетанилидами [9], содержащими, как и белковые молекулы, пептидные группы. В этих экспериментах было показано существование автолокализованных солитоноподобных состояний, образованных за счет взаимодействия внутримолекулярных возбуждений с либрационными колебаниями или же с низкочастотными внутримолекулярными колебаниями (ВМК). Автолокализованные состояния имеют энергию связи 10 см$^{-1}$ (давыдовские солитоны, судя по оценкам [8], имеют энергию связи ~ 1 см$^{-1}$), поэтому на них особо сильное влияние должно оказывать электромагнитное излучение миллиметрового диапазона. Если предположить, что энергия в биосистемах запасается в виде автолокализованных состояний, то ясна актуальность изучения воздействия электромагнитного излучения на них.

В настоящей работе проанализированы равновесные конфигурации пептидных групп в α-спиральных биополимерах. Показана возможность управления ими внешним электрическим полем. Изучены самосогласованные состояния внутримолекулярных возбуждений с ориентационными колебаниями пептидных групп. Проанализированы особенности взаимодействия электромагнитных волн с данными возбужденными состояниями.

2. Равновесная конфигурация пептидных групп в спиральных молекулах. α-Спиральные белковые молекулы обладают хорошо выраженной квазипериодической структурой. Очень ярко эта тенденция просматривается в расположении пептидных групп молекул, положение которых, как известно [10], можно показать формулой

$$R_{n\alpha}=R\left[\vec{i}\cos\frac{2\pi}{p}(3n+\alpha)+\vec{j}\sin\frac{2\pi}{p}(3n+\alpha)\right]+\frac{a}{p}(3n+\alpha)\vec{k}, \qquad (1)$$

где $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ - единичные орты; $\alpha = 1, 2, 3$ - номер цепочки водородно связанных пептидных групп; $n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$ - номер пептидных групп в цепочке; R - радиус спирали; a - ее шаг, p - число пептидных групп, приходящихся на один виток спирали. В реально

существующих белковых молекулах $\rho = 3{,}6$. Такое значение ρ отражает тот факт, что цепочки водородно связанных пептидных групп, в свою очередь, образуют спирали. В данной работе α-спиральная молекула моделируется системой из трех параллельных цепочек, оси которых проходят через вершины правильного треугольника, т.е. считаем, что в (1) $\rho = 3$.

Пептидные группы характеризуются довольно большим стационарным дипольным моментом ($d_g \simeq 3{,}5\ D$ [11]); диполь-дипольное взаимодействие пептидных групп – один из главных факторов, определяющих ориентацию пептидных групп в молекуле. Ориентирующее действие водородных связей будем моделировать введением электрического поля напряженности E_H, направленного вдоль оси молекул. Кроме того, поскольку белковые молекулы часто входят в состав мембран, между внутренней и внешней поверхностями которых имеется разность потенциалов, будем считать, что помимо E_H вдоль оси молекулы приложено внешнее электрическое поле E. Проанализируем, как меняются равновесные ориентации пептидных групп в молекуле с изменением E.

Равновесная конфигурация определяется путем минимизации функции

$$\varepsilon = -\sum_{n\alpha}(E+E_H)d^2_{n\alpha} + \frac{1}{2}\sum_{n\alpha,n'\alpha'}\left|R_{n\alpha} - R_{n'\alpha'}\right|^{-3} \times \tag{2}$$

$$\times\left[(d_{n\alpha}d_{n'\alpha'}) - 3\left(d_{n\alpha}\frac{R_{n\alpha}-R_{n'\alpha'}}{|R_{n\alpha}-R_{n'\alpha'}|}\right)\left(d_{n'\alpha'}\frac{R_{n\alpha}-R_{n'\alpha'}}{|R_{n\alpha}-R_{n'\alpha'}|}\right)\right],$$

где $d_{n\alpha} = d_g(\sin\theta_{n\alpha}\cos\varphi_{n\alpha}, \sin\theta_{n\alpha}\sin\varphi_{n\alpha}\cos\theta_{n\alpha})$– дипольный момент пептидной группы, ориентация которого определяется углами $\theta_{n\alpha}$ и $\varphi_{n\alpha}$.

Из трансляционной инвариантности системы вдоль оси биополимера Z следует, что минимум функции (1) следует искать в подпространстве $\theta_{n\alpha} = \theta_\alpha$, $\varphi_{n\alpha} = \varphi_\alpha$.

Анализ (1) для этого случая показывает, что конфигурации, при которых достигается минимум ε, определяются соотношениями

$$\theta_\alpha = \theta, \quad \varphi_1 = \frac{2\pi}{3}, \quad \varphi_2 = -\frac{2\pi}{3}, \quad \varphi_3 = 0, \tag{3}$$

и

$$\varphi_1 = -\frac{\pi}{3}, \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{3}, \quad \varphi_3 = \pi. \tag{4}$$

При этом $\cos\theta = \frac{2}{3}\frac{(E+E_H)d_g}{3(3J-4J')}$, когда $(E+E_H)d_g < 6(0{,}75J - J')$ и $0{,}75J > J'$, где $J' = d_g^2\left|R_{n\alpha} - R_{n+1,\alpha}\right|^{-3}$; $J = d_g^2\left|R_{n1} - R_{n2}\right|^{-3}$. Если же $0{,}75J < J'$, а также $0{,}75J > J'$, но $(E+E_H)d_g > 6(0{,}75J - J')$, то все пептидные группы параллельны оси Z:

$$\theta = 0. \tag{5}$$

Сравнение конфигураций (3), (4) и (5) с конфигурацией пептидных групп в реальных α-спиральных молекулах показывает, что ближе к реальности конфигурация (3), (4)*.

Интересным свойством рассматриваемой системы является то, что ориентацией пептидных групп можно управлять с помощью внешнего поля. Конфигурация (3), (4) рождается в противоборстве двух тенденций: межцепочечные взаимодействия стремятся оставить дипольные моменты в плоскости X, Y, расположив их вдоль биссектрис треугольника; внутрицепочечное взаимодействие, водородные связи и внешнее поле стремятся ориентировать дипольные моменты вдоль оси Z.

<u>3. Эксимерные состояния полипептидных цепочек.</u> Как уже упоминалось, Мак Клэр [3], обсуждая возможные механизмы мышечного сокращения, высказал гипотезу, что энергия гидролиза АТФ запасается в белковых молекулах в виде эксимеров – связанных состояний возбужденной и невозбужденной молекул и, опираясь на эту гипотезу, попытался объяснить, почему энергия гидролиза АТФ не диссипирует за времена порядка 10^{-13} с, а может быть эффективно использована для выполнения полезной работы.

Обсудим эту идею в рамках развитой в п.2 модели. Будем предполагать, что выделившаяся в результате гидролиза АТФ энергия приводит к возбуждению одного из ВМК пептидной группы. При переходе пептидной группы в возбужденное состояние ее дипольный момент меняется, поэтому меняется и взаимодействие возбужденной пептидной группы с невозбужденными. В результате молекулам может оказаться выгодным изменить свою взаимную ориентацию или расстояние между ними, что и приводит к образованию эксимерного состояния.

Рассмотрим сначала возбужденные состояния системы из трех пептидных групп, образующих элементарную ячейку биополимера**. Оператор энергии возбуждения такой системы можно представить в виде суммы

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_{vib} + \mathcal{H}_{or} + \mathcal{H}_{int}. \tag{6}$$

Здесь

$$\mathcal{H}_{vib} = \sum_{\alpha=1,2,3}\varepsilon_f B^+_\alpha B_\alpha + L\sum_{\alpha,\alpha'(\alpha\neq\alpha')}B^+_\alpha B_{\alpha'} \tag{7}$$

---

* Об этом свидетельствуют и оценки J' и J, полученные для параметров реальных молекул $J' \approx 1{,}2$ эВ, $J = 1{,}9$ эВ, и видно, что $3J > 4J'$. При $E_H d_g = 0{,}6$ эВ $\theta \approx 60°$.

** Напомним, что рассматривается спираль из пептидных групп с $\rho = 3$.

есть оператор энергии ВМК, где B_α^+ (B_α) – оператор рождения (уничтожения) ВМК пептидной группы α ($\alpha = 1,2,3$); ε_f – энергия ВМК; L – матричный элемент резонансной передачи ВМК между пептидными группами;

$$\mathcal{H}_{or} = \frac{1}{2}\sum_{\alpha} I(\delta\dot{\varphi}_\alpha)^2 + 5J\sin^2\theta\sum_{\alpha}(\delta\varphi_\alpha)^2 - \frac{5J}{16}\sin^2\theta\sum_{\alpha,\alpha'}(\delta\varphi_\alpha - \delta\varphi_{\alpha'})^2 \qquad (8)$$

есть гамильтониан ориентационных колебаний пептидных групп, в которых $\delta\varphi_\alpha$ – азимутальное отклонение α-пептидной группы от ее равновесного положения, задаваемого соотношениями (3); I – момент инерции;

$$\mathcal{H}_{int} = \sqrt{6}\,\chi[B_1^+B_1(\delta\varphi_2 - \delta\varphi_3) + B_2^+B_2(\delta\varphi_3 - \delta\varphi_1) + B_3^+B_3(\delta\varphi_1 - \delta\varphi_2)] \qquad (9)$$

есть оператор взаимодействия ВМК с ориентационными колебаниями системы. Здесь

$$\chi = \frac{1}{4\sqrt{2}}J\left(\frac{d_f}{d_g} - 1\right)\sin^2\theta; \qquad (10)$$

d_f – дипольный момент пептидной группы в возбужденном состоянии.

Заметим, что кроме азимутальных колебаний имеются еще меридиональные $\delta\theta_\alpha$. Однако взаимодействие с ними ВМК гораздо слабее.

Осуществим в (6) – (9) унитарное преобразование

$$\delta\varphi_\alpha = \sum_\mu A_{\alpha\mu}\eta_\mu, \qquad B_\alpha = \sum_\mu c_\mu A_{\alpha\mu} \qquad (11)$$

с матрицей

$$A = \begin{pmatrix} 6^{-1/2} & 2^{-1/2} & 3^{-1/2} \\ -\left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} & 0 & 3^{-1/2} \\ 6^{-1/2} & -2^{-1/2} & 3^{-1/2} \end{pmatrix}.$$

В результате вместо (7) – (9) получим

$$\mathcal{H}_{vib} = (\varepsilon_f + 2L)C_3^+C_3 + (\varepsilon_f - L)\sum_{\alpha=1,2} C_\alpha^+C_\alpha, \qquad (12)$$

$$\mathcal{H}_{or} = \frac{I}{2}\sum_{\mu=1,2,3}(\dot{\eta}_\mu)^2 + \frac{k}{2}(\eta_1^2 + \eta_2^2) + \frac{\tilde{k}}{2}\eta_3^2, \qquad (13)$$

где $k = 2{,}25\,J\sin^2\theta$; $\tilde{k} = 6J\sin^2\theta$;

$$\mathcal{H}_{int} = \chi[(C_1^+C_1 - C_2^+C_2)\eta_2 + (C_1^+C_2 + э.с.)\eta_1 + (C_2^+C_3 + э.с.)\eta_1 - \sqrt{2}\,(C_1^+C_3 + э.с.)\eta_2]. \qquad (14)$$

В адиабатическом приближении собственные функции гамильтониана (6), (12)-(14) ищем в виде

$$\Psi = \sum_\mu U_\mu(\eta_1, \eta_2)C_\mu^+|0\rangle, \qquad (15)$$

где $|0\rangle$ описывает состояние системы без ВМК. При этом собственные энергии могут быть найдены из уравнения

$$\left(\varepsilon - \varepsilon_f - \frac{k}{2}\eta^2 - \chi\eta + L\right)\left(\varepsilon - \varepsilon_f - \frac{k}{2}\eta^2 + \chi\eta + L\right)\left(\varepsilon - \varepsilon_f - \frac{k}{2}\eta^2 - 2L\right) - 2\left(\varepsilon - \varepsilon_f - \frac{k}{2}\eta^2 + L\right)\chi^2\eta^2 - 2(\chi\eta)^3\cos 3\psi = 0. \qquad (16)$$

Здесь $\eta_1 = \eta\sin\psi$; $\eta_2 = \eta\cos\psi$. Три корня ε_μ этого уравнения определяют соответственно три потенциальных функции для ориентационных движений рассматриваемой системы пептидных групп. Примечательно при этом появление последнего слагаемого в (16). Оно отражает то обстоятельство, что в возбужденном состоянии у системы возникает анизотропия в плоскости, перпендикулярной оси молекулы, которой не было в основном состоянии.

Между пептидными группами осуществляется интенсивный обмен возбуждениями (об этом свидетельствуют и эксперименты Невской и Чигадзе [12], показавшие, что матричные элементы резонансной передачи возбуждения между молекулами из разных спиралей водородно связанных пептидных групп довольно велики и составляют ≈ 12 см$^{-1}$). Поэтому положим, что

$$|L| > \chi\,|\eta|. \qquad (17)$$

Для собственных энергий получаем

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_f - L + \frac{k}{2}\eta^2 + \chi\eta + \frac{2}{3}\frac{\chi^2\eta^2}{L}\cos^2\frac{3\psi}{2},$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f - L + \frac{k}{2}\eta^2 - \chi\eta + \frac{2}{3}\frac{\chi^2\eta^2}{L}\sin^2\frac{3\psi}{2}, \qquad (18)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_f + 2L + \frac{k}{2}\eta^2 - \frac{2}{3}\frac{\chi^2\eta^2}{L} + \frac{2}{9}\frac{\chi^3\eta^3}{L^2}\cos 3\psi.$$

Рассматривая (18) как потенциальные функции для ориентационных движений пептидных групп, видим, что в то время как в состояниях с энергиями ε_1 и ε_3 минимум потенциальных функций достигается при $\eta_1 = \eta_2 = 0$, в состоянии с $\varepsilon = \varepsilon_2$ минимум реализуется при

$$\eta = \chi / k, \quad \psi = 0, \quad \frac{2\pi}{3}, \quad \frac{4\pi}{3}, \tag{19}$$

т.е. в этом (эксимерном) состоянии системе выгодно изменить взаимную ориентацию пептидных групп, что позволяет добиться выигрыша в энергии

$$\Delta = \frac{\chi^2}{2k} = \left(\frac{d_f - d_g}{12 d_g} \right)^2 J \sin^2 \theta. \tag{20}$$

Обсудим коллективные свойства рассмотренных состояний. С этой целью учтем, что в α-спиральных белковых молекулах помимо передачи возбуждений между соседними пептидными группами из разных цепочек (L) имеется еще резонансная передача возбуждения вдоль цепочек (M). При этом, если $|M| < |L|$ (для Амид I $|M| = 7{,}8$ см$^{-1}$, а $|L| = 12{,}4$ см$^{-1}$ [12]), естественно предположить, что эксимерное состояние создается быстрее, чем возбуждение передается вдоль цепочки. Тогда первому и третьему из состояний (18) в α-спиральном биополимере отвечают экситонные зоны шириной порядка M, а второму эксимерному состоянию – зона на фактор $exp(-\chi^2/2k^2\eta_0^2)$ меньше ($\eta_0^2 = \hbar / 2\sqrt{Ik}$ – квадрат амплитуды нулевых либраций пептидной группы). Ясно, что если деформация при образовании эксимерного состояния велика по сравнению с амплитудой нулевых колебаний, то эксимерное состояние практически не будет иметь дисперсии и энергия возбуждения будет сохраняться в том месте, где она была рождена.

Если на α-спиральную молекулу падает электромагнитная волна

$$E(t) = (E_x(t), \; E_y(t), \; 0), \tag{21}$$

то оператор ее взаимодействия с молекулой можно записать в виде $W(t) = \sum_{n\alpha} (E(t) d_\alpha) B^+_{n\alpha} B_{n\alpha}$, где $d_\alpha = d_{f\alpha} - d_{g\alpha}$, или, учитывая (11), – в виде

$$W(t) = \sum_n \left\{ \frac{1}{\sqrt{12}} (d_1 - d_2) \, C^+_{n1} C_{n2} + \frac{1}{\sqrt{6}} (d_1 - d_3) \times \right.$$

$$\left. \times C^+_{n2} C_{n3} + \frac{1}{3\sqrt{2}} (d_1 + d_3 - 2d_2) \, C^+_{n1} C_{n3} \right\} E(t) + \text{эрм. сопр.} \tag{22}$$

Переход из эксимерного состояния в ближайшее к нему по энергии экситонное наиболее вероятен при частоте электромагнитного поля*

$$\omega_1 = 2\chi^2 / \hbar k. \tag{23}$$

Второй резонансной частотой будет $\omega_2 = 1/\hbar (3L + \chi^2/k)$, определяющая переход из эксимерного в более высокое экситонное состояние.

Аналогичный вывод можно сделать относительно комбинационного рассеяния света (КРС) на α-спиральных молекулах, находящихся в состоянии возбуждения. В спектрах КРС могут наблюдаться линии, отвечающие переходам из эксимерного в экситонные (солитонные) состояния биополимеров, что может свидетельствовать об эксимерном механизме хранения энергии в биомолекулах.

По поводу частотного интервала, в котором следует искать соответствующие линии КРС поглощения света, заметим, что, поскольку, как следует из (23), $\hbar\omega_1 = 2\Delta = 0{,}14\left(\frac{d}{d_g} - 1\right)^2 J \sin^2\theta$, а $J \simeq 2$ эВ, то при θ = 30–60 получим, что резонансная длина волны определяется выражением $\lambda_1 \simeq 10^{-2}\left(\frac{d_f}{d_g} - 1\right)^{-2}$ см. Таким образом, для того чтобы переходы происходили под действием волн миллиметрового диапазона, необходимо, чтобы дипольные моменты пептидных групп в основном и возбужденном состояниях отличались на десятки процентов, что вполне реально.

Работа выполнена по программе ВК "Отклик".

1. Davydov A.S. Solitons and energy transfer along protein molecules // J. Theor. Biol. – 1977. – 66. – P. 379–387.
2. Давыдов А.С. Солитоны в молекулярных системах. – Киев : Наук. думка, 1984. – 288 с.
3. Mc Clare C.W.F. A quantum mechanical muscle model // Nature.– 1972. – 240, N 5376. – P. 88–90.
4. Solitons / Eds S.E.Trullinger, V.E.Zakharov, V.L.Pokrovsky.– Horth-Holland, 1986. – 634 p.
5. Давыдов А.С. Движение солитона в одномерной молекулярной цепочке с участием тепловых колебаний // Ж. эксперим. и теор. физики. – 1980. – 78, № 2. – С. 789–796.
6. Давыдов А.С. Квантовая теория движения квазичастицы в молекулярной цепи при учете тепловых колебаний // Физ. многочастич. систем. – 1987. – № 12. – С. 1–20.
7. Еремко А.А. Диссоциация давыдовских солитонов в поле электромагнитной волны // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1984. – № 3. – С. 52–59.
8. Eremko A.A., Gaididei Yu.B., Vakhnenko A.A. Dissociation-accompanied Raman scattering by Davydov solitons // Phys. status solidi. B. – 1985. – 127. – P. 703–713.
9. Eilbeck J.C., Lomdahl P.S., Scott A.C. Soliton structure in crystalline acetanilide // Phys. Rev. B. – 1984. – 30, N 8.– P. 4703–4712.

---

* Предполагается, что деформация в эксимерном состоянии велика по сравнению с амплитудой нулевых вибраций.

10. Давыдов А.С. Биология и квантовая механика. – Киев: Наук.думка, 1979. – 296 с.
11. Hol W.G.J., Van Duijnen P.T., Berendsen H.J.C.The alpha-helix dipole and properties of proteins // Nature. – 1978. – 273, N 5662. – P. 443-446.
12. Nevskaya N.A., Chigadze Yu.N. Infrared spectra and resonance interaction of Amid I and II vibrations of α-helix // Biopolymers. – 1976. – 15. – P. 639-649.

УДК 536; 557; 574; 577

А.В.Чалый

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ УПОРЯДОЧЕНИЯ В СРЕДАХ С БИОХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ

Важной спецификой систем, в которых происходят процессы упорядочения и самоорганизации, является существенное влияние на их свойства различных внешних воздействий (механических, химических,электрических, магнитных, электромагнитных и др.). Для понимания сущности процессов,происходящих в открытых медико-биологических системах (прежде всего в организме человека) во внешних полях, рассмотрим вопрос об образовании упорядоченных структур на уровне биохимических реакций, ответственных за синаптические механизмы передачи информации.

1. Среди развитых к настоящему времени методов описания процессов образования пространственных структур и ритмических явлений наиболее последователен метод, использующий современные теории фазовых переходов и критических явлений [1, 2]. Именно на этой строгой теоретической основе удается объяснить наличие когерентности на макроскопически больших расстояниях и временах. Особенность такого подхода, которая отсутствует в методах,основанных на применении кинетических моделей и теории нелинейных колебаний, заключается также в принципиальной возможности установления связи различных важных характеристик процессов упорядочения (например, пространственных и временных периодов когерентных структур) с физическими и другими параметрами исследуемых систем [3, 4].

Явления, происходящие вблизи линий (точек) фазовых переходов или границ устойчивости однородного состояния вещества, обладают универсальной общностью. Причина связана с коллективной, синергетической природой этих явлений и с определяющей ролью взаимодействия флуктуаций характерного параметра порядка исследуемой системы. Именно это обстоятельство лежит в основе известного принципа образования упорядоченных структур – "порядок через флуктуации".

Выяснение основных закономерностей в поведении систем вблизи линий фазовых переходов и границ устойчивости (в дальнейшем предполагается, что исследуемая система, включая человеческий организм, находится именно в таком состоянии с аномально большой восприимчивостью к внешним воздействиям) требует выделения главной, управляющей моды или, что то же самое, – параметра порядка и учета флуктуаций этого параметра порядка, скоррелированных на больших расстояниях и временах.

Параметром порядка системы с химическими (биохимическими) реакциями является степень полноты $\xi(\vec{r})$, определяемая как

$$d\xi(\vec{r}) = dn_i(\vec{r})/\nu_i, \qquad (1)$$

где $dn_i(\vec{r})$ – изменение числа молей компонента i в процессе биохимической реакции; ν_i – стехиометрические коэффициенты. Сопряженной для степени полноты $\xi(\vec{r})$ величиной является сродство реакции $A(\vec{r})$, представляющее собой линейную комбинацию химических потенциалов компонентов смеси:

$$A(\vec{r}) = \sum_{i\geq 1} \nu_i \mu_i(\vec{r}). \qquad (2)$$

Величина, обратная восприимчивости χ биохимической реакции, выражается согласно формуле

$$\chi^{-1} = -\left(\frac{\partial A}{\partial \xi}\right)_{P,T} = \sum_{i,j} \nu_i \nu_j \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial n_j}\right)_{P,T,n_k \neq n_j} \qquad (3)$$

через производные от химических потенциалов по числу молей компонентов, участвующих в реакции. Эта величина, точнее нулевой пространственный момент прямой корреляционной функции (ПКФ) $C(r)$ биохимической реакции, представляемая в виде

$$C_0 = \int C(r)\, d\vec{r} = -\frac{1}{k_Б T}\left(\frac{\partial A}{\partial \xi}\right)_{P,T}, \qquad (4)$$

определяет коэффициент при квадрате параметра порядка в разложении флуктуационной части свободной энергии Гиббса.

2. Представим исследуемую систему как жидкий диэлектрик, находящийся во внешнем электрическом поле. Химический потенциал такой системы имеет вид [5]

$$\mu = \mu_0 - \frac{\varepsilon_0}{2}\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}\right)_T E^2, \qquad (5)$$

где μ_0 – химический потенциал среды в нулевом поле. С учетом соотношений (1) – (5) вклад в величину C_0, связанный с наличием электрического поля, составляет

$$\Delta C_0^E = -\frac{\varepsilon_0 E^2 N_A}{2 k_Б T} \sum_{i,j} \nu_i \nu_j \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial \rho_i \partial \rho_j}\right)_T. \qquad (6)$$

Видно, что этот вклад пропорционален квадрату напряженности электрического поля и второй производной от диэлектрической проницаемости по плотности. Принимая во внимание корреляционные поправки от эффектов пространственной дисперсии к величине диэлектрической проницаемости, определяемой стандартным приближением Лоренц – Лоренца, можно показать, что

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{кор}}{\partial \rho_i\, \partial \rho_j} \sim \begin{cases} R_C^{1+2/\zeta} & \text{при} \quad kR_C < 1, \\ R_C^{\frac{2}{\zeta}-1} & \text{при} \quad kR_C > 1, \end{cases} \tag{7}$$

где k – волновое число; R_C – радиус корреляции флуктуаций параметра порядка. Согласно (7) при переходе через границу устойчивости в области сильной пространственной дисперсии, где $R_C \to \infty$, вторая производная $\partial^2 \varepsilon_{кор} / \partial\rho_i\, \partial\rho_j$ имеет особенность, поскольку критический индекс $\zeta \approx 1{,}8$ и $\frac{2}{\zeta} - 1 \approx 0{,}1$.

Если среда обладает не только электрическими, но и магнитными свойствами (биологические ткани организма человека являются, как правило, диамагнетиками), а также находится во внешнем электромагнитном поле, то вклад в величину C_0 определяется соотношением

$$\Delta C_0^{E,H} = -\frac{N_A}{2k_Б T}\sum_{i,j}\nu_i \nu_j\left(\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial\rho_i\,\partial\rho_j}E^2 + \tilde{\mu}_0 \frac{\partial^2 \tilde{\mu}}{\partial\rho_i\,\partial\rho_j}H^2\right), \tag{8}$$

где $\tilde{\mu}$ – относительная магнитная проницаемость; H – напряженность магнитного поля.

Нулевой момент ПКФ, как отмечалось выше, определяет обратную восприимчивость, а совместно со вторым пространственным моментом C_2 – радиус корреляции флуктуаций степени полноты биохимической реакции. Последний результат может быть получен и проанализирован на основе общей теории критических флуктуаций параметра порядка во внешних полях, развитой в [6]. В отсутствие электромагнитного поля радиус корреляции

$$R_C^0 = \sqrt{\frac{C_2}{C_0}} = \left\{\frac{N_A}{k_Б T C_2}\sum_{i,j}\nu_i\nu_j\left\{\frac{\partial \mu_{iC}}{\rho_j} + \frac{\partial}{\rho_j}\left[\frac{P-P_{iC}}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_i}\left(\frac{\partial P_i}{\partial T}\right)_\rho (T - T_{iC})\right]\right\}\right\}^{-1/2} \tag{9}$$

определяется лишь близостью температуры и давления системы с биохимическими реакциями к их критическим значениям T_{iC} и P_{iC}. Под действием внешнего электромагнитного поля изменяется радиус корреляции

$$R_C^{E,H} = \left\{C_2 \Big/ \left[C_0 - \frac{N_A}{2k_Б T}\sum_{i,j}\nu_i\nu_j\left(\varepsilon_0\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial\rho_i\,\partial\rho_j}E^2 + \tilde{\mu}_0\frac{\partial^2\tilde{\mu}}{\partial\rho_i\,\partial\rho_j}H^2\right)\right]\right\}^{1/2}. \tag{10}$$

Полученное значение изменения радиуса корреляции можно интерпретировать в терминах изменения критических параметров вещества:

а) критической температуры

$$T_{iC}^*(E,H) = T_{iC}\,\frac{\rho_i}{2}\left(\frac{\partial T}{\partial P_i}\right)_\rho\left(\varepsilon_0\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho_i}E^2 + \tilde{\mu}_0\frac{\partial\tilde{\mu}}{\partial\rho_i}H^2\right) \tag{11}$$

при неизменном критическом значении парциального давления P_{iC};

б) критического парциального давления

$$P_{iC}^*(E,H) = P_{iC} + \frac{\rho_i}{2}\left(\varepsilon_0\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho_i}E^2 + \tilde{\mu}_0\frac{\partial\tilde{\mu}}{\partial\rho_i}H^2\right) \tag{12}$$

при неизменном значении T_{iC}.

Критические параметры P_{iC} и T_{iC} компонентов биохимической реакции могут сильно различаться. Поэтому зависимость восприимчивости $\chi = |\partial A/\partial\xi|$ в изобарных условиях от температуры представляется достаточно сложной функцией, достигающей локальных максимумов с приближением к критическим значениям T_{iC}^* (E, H) каждого из компонентов. Главный максимум в этой зависимости соответствует, очевидно, реализации критического (бифуркационного) значения для основного параметра порядка – управляющей моды биохимической реакции.

3. Проанализируем условия образования упорядоченных структур в системе с биохимическими реакциями при наличии внешнего электромагнитного поля. Пусть исходное состояние биохимической системы таково, что нулевой и второй пространственные моменты ПКФ являются положительными:

$$C_0 = -\frac{1}{k_Б T}(\partial A/\partial\xi)_{P,T} = \int C(r)\,d\vec{r} > 0,$$

$$C_2 = \frac{1}{2}\int C(r)\,r^2\,d\vec{r} > 0.$$

В этом случае статическая парная корреляционная функция (КФ)

$$G_{2\xi}(R) = \frac{V}{k_Б T}\langle \xi(\vec{r}_1)\,\xi(\vec{r}_2)\rangle, \qquad R = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|.$$

флуктуаций степени полноты, описывающая взаимное влияние характера протекания биохимической реакции в различных точках $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ системы (например, организма человека), имеет следующий вид в трехмерном пространстве:

$$G_{2\xi}(R) = \left(\frac{V}{4\pi k_Б T C_2}\right)\exp\left(-\frac{R}{R_C}\right)/R, \tag{13}$$

где радиус корреляции R_c определяется формулой (9) или (10). Видно, что с приближением к границе термодинамической устойчивости биохимической системы, на которой нулевой момент ПКФ $C_0 \to 0$, корреляции между локальными флуктуациями степени полноты $\xi(\vec r)$ медленно убывают с расстоянием ($G_{2\xi} \sim R^{-1}$), т.е. становятся дальнодействующими. Этот результат означает, естественно, что статические структуры в такой биохимической среде не могут возникнуть.

Ситуация радикально изменится при смене знака одного из моментов, т.е. при условии, что $C_0<0$, $C_2>0$ (термодинамически неустойчивая система) или $C_0>0$, $C_2<0$ (среда с восходящей диффузией, т.е. с отрицательным коэффициентом диффузии). Рассмотрим среду с биохимическими реакциями на нетермодинамической ветви состояний ($C_0<0$, $C_2>0$). Для такой трехмерной среды КФ флуктуаций степени полноты биохимической реакции

$$G_{2\xi} \sim N_{1/2}\left(\frac{|\vec r_1-\vec r_2|}{R_c}\right)\Big/|\vec r_1-\vec r_2|^{1/2}, \qquad (14)$$

где $N_{1/2}(z)$ – цилиндрическая функция Неймана, а радиус корреляции $R_c=\sqrt{C_2/|C_0|}$. Результат (14) означает, что в системе возникает медленно затухающая, периодическая в пространстве корреляция между локальными значениями степени полноты $\xi(\vec r)$, т.е. реализуется когерентное влияние биохимических процессов в различных объемах на расстояниях порядка длины волны возникающих упорядоченных структур $\lambda_0=2\pi\sqrt{C_2/|C_0|}$. С приближением к границе устойчивости ($C_0\to 0$) характерный размер периодических биохимических структур становится достаточно большим, достигая макроскопических величин.

Обратимся к полученным ранее формулам для C_0 в отсутствие электромагнитного поля и для поправки $\Delta C_0^{E,H}$, вызванной включением электромагнитного поля. Легко видеть, что если вначале $C_0 \gtrsim 0$, то, поскольку $\Delta C_0^{E,H}<0$, может произойти изменение знака величины нулевого момента при $E, H \neq 0$: $C_0+\Delta C_0^{E,H}<0$. Переход от $C_0 \gtrsim 0$ к $C_0+\Delta C_0^{E,H}<0$ достигается при достаточно больших величинах напряженностей E и H, а также при аномально больших значениях производных $\partial^2\varepsilon/\partial\rho_i\partial\rho_j$ и $\partial^2\mu/\partial\rho_i\partial\rho_j$. Как отмечалось выше, рост производных может реализоваться вблизи точек фазовых переходов. Кроме того, существенное возрастание производных возможно в результате специфических для СВЧ и КВЧ диапазонов резонансных эффектов в диэлектрических средах, входящих в организм человека (вода, кровь, лимфа, спинномозговая жидкость и др.).

Очевидно, под влиянием внешнего электромагнитного поля происходит переход биохимической системы из области термодинамической устойчивости ($C_0>0$) в термодинамически неустойчивую область

($C_0+\Delta C_0^{E,H}<0$). Однако последнее состояние обладает (и это имеет принципиальное значение) структурной устойчивостью в том смысле, что благодаря эффекту нелокальности (пространственной дисперсии) флуктуаций $\xi(\vec r)$ величина $C_0+\Delta C_0^{E,H}+C_2k^2 \gtrsim 0$. Отсюда следует соотношение для характерного размера упорядоченной структуры в области термодинамической неустойчивости: $\lambda_0=2\pi/k=\sqrt{C_2/|C_0+\Delta C_0^{E,H}|}$.

Таким образом, физико-химический механизм перехода системы в упорядоченное состояние под действием электромагнитного поля основан на эффективном изменении температуры и давления и, как следствие, на изменении знака нулевого момента ПКФ, переводящих ранее устойчивую бесструктурную систему под границу устойчивости (спинодаль), где термодинамическая неустойчивость стабилизируется возникновением когерентных упорядоченных структур.

4. Для частот химических (биохимических) и электромагнитных процессов в СВЧ и КВЧ диапазонах имеет место сильное неравенство $\nu_{э\text{-}м} \gg \nu_{биохим}$, что позволяет оценивать эффекты воздействия внешних электромагнитных полей как усредненные за период биохимической периодической реакции.

В среде с дисперсией происходит диссипация электромагнитного излучения, связанная с ее поглощением [5]. Для монохроматической электромагнитной волны частоты ω количество энергии, поглощенное за единицу времени в единице объема среды, составляет

$$Q=\omega(\xi\varepsilon''\bar E^2+\tilde\mu_0\tilde\mu''\bar H^2),$$

где ε'' и $\tilde\mu''$ – мнимые части диэлектрической и магнитной проницаемости, а черта означает усреднение по времени. С учетом равенства электрической и магнитной составляющих плотности энергии в электромагнитной волне и очевидного соотношения $\bar E^2=1/2E_0^2$, где E_0 – амплитуда напряженности электрического поля, имеем $Q=\omega\xi\varepsilon''E_0^2$.

Для оценки численного значения Q примем, что длина волны электромагнитного излучения $\lambda = 3$ мм, т.е. $\omega \approx 6{,}3\cdot10^{11}$ рад/с, а поверхностная плотность подводимой к объекту мощности в электромагнитной волне (вектор Умова – Пойнтинга) $|\vec S|=2w_Ec=2\varepsilon\xi\bar E^2c=\varepsilon\varepsilon_0E_0^2c$ имеет порядок $|\vec S|\approx 1$ мВт/см^2 = 10 Вт/м^2. Отсюда следует, что объемная плотность энергии электромагнитной волны $\varepsilon\varepsilon_0E_0^2=|\vec S|/c\approx 3\cdot10^{-8}$ Дж/м^3. Учитывая, что мнимая часть диэлектрической проницаемости вблизи точек фазовых переходов в результате учета парных корреляций по порядку величины составляет $\varepsilon''\approx 10^{-4}\varepsilon$ [7, 8], имеем окончательно $Q\approx 2$ Вт/м^2.

Полученный результат необходимо сравнить с тем значением

энергии единицы объема физико-химической системы, которое нужно сообщить за единицу времени, чтобы достичь границу устойчивости этой системы. Другими словами, следует оценить величину $(P_i - P_{ic})\nu_{биохим}$ при изотермическом подходе к границе устойчивости или величину $(\partial P/\partial T)_\rho (T-T_{ic})\nu_{биохим}$ при ее изобарном достижении. Используя реальные значения отклонений давления и температуры от их критических значений: $(P-P_{ic})/P_{ic} \approx 10^{-5}$ и $(T-T_{ic})/T_{ic} \approx 10^{-5}$, а также размерную оценку производной $(\partial P/\partial T)_\rho \approx nP_c/T_c$, где $n \approx 1$ (в модели Ван-дер-Ваальса $n = 4$), и, принимая, что $P_{ic} \approx 10^5$ Па и $\nu_{биохим} \approx 10^{-2}$ с$^{-1}$, получаем

$$(P-P_{ic})\nu_{биохим} \approx 10^{-2}\ Вт/м^3, \qquad (15)$$

$$(\partial P/\partial T)_\rho (T-T_{ic})\nu_{биохим} \approx 4\cdot 10^{-2}\ Вт/м^3.$$

Сравнение оценок величины Q и приведенных в (15) значений показывает, что достаточно малые мощности электромагнитного излучения миллиметрового диапазона могут вызвать переход системы с биохимическими реакциями через границу устойчивости и образование в ней упорядоченных структур. Критерием образования таких структур под действием внешнего электромагнитного поля является выполнение следующих неравенств:

при $P=const$

$$\omega\varepsilon''\varepsilon_0 E_0^2 \Big/ \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_\rho (T-T_{ic})\nu_{биохим} > 1, \qquad (16)$$

при $T=const$

$$\omega\varepsilon''\varepsilon_0 E_0^2/(P-P_{ic})\nu_{биохим} > 1. \qquad (17)$$

Из (16) и (17) следует, что образованию упорядоченных структур в системах с биохимическими реакциями под воздействием электромагнитного поля способствует увеличение частоты электромагнитных колебаний, амплитуды E_0 электрического поля, мнимой части ε'' диэлектрической проницаемости, а также уменьшение частоты периодических биохимических (или химических) процессов $\nu_{биохим}$ и приближение термодинамических параметров (температуры и давления) к их критическим (бифуркационным) значениям, т.е. уменьшение отклонений $T-T_{ic}$ и $P-P_{ic}$.

Полученные результаты позволяют предложить следующий реалистический механизм влияния электромагнитного излучения СВЧ и КВЧ диапазонов на физико-химические (биохимические) процессы, происходящие в организме человека. Воздействующее излучение (например, на биологически активные точки) резонансно поглощается по одному

или нескольким молекулярным каналам. Детальная схема функционирования этих каналов должна быть основана на микроскопических соображениях, подобных рассмотренным в [9] и использующих методы квантовой механики и молекулярной биофизики. Заметим, что одним из интересных вопросов, связанных с этим направлением исследований, является выяснение частотной зависимости электродинамических характеристик типа ε'' и $\tilde{\mu}''$, ответственных за поглощение электромагнитного излучения в биологических тканях и жидкостях организма человека, а также установление их экстремальных свойств для СВЧ и КВЧ диапазонов электромагнитного излучения. Поглощенное электромагнитное излучение приводит к возникновению нового типа упорядочения, который характеризуется когерентным характером протекания биохимических реакций из-за наличия дальнодействующей, макроскопической и периодической в пространстве связи между локальными значениями степени полноты реакции. Возникающие пространственные структуры обладают, как указывалось выше, экстремумами восприимчивости к внешним воздействиям, а также экстремальными значениями коэффициента электропроводности σ. Действительно, величина σ определяется пространственно-временной КФ токов, которая в разумном приближении выражается через произведение корреляторов скоростей и концентраций. Последний коррелятор непосредственно связан с восприимчивостями компонентов смеси. Таким образом, получаемые пространственные когерентные структуры, обладающие экстремумами восприимчивости и электропроводности, и есть те направления (их можно назвать, если угодно, и меридианами), вдоль которых осуществляется синаптическая передача информации.

Работа выполнена по программе ВК "Отклик".

1. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. - М.: Наука, 1975. - 256 с.
2. Вильсон К., Когут Дж. Ренормализационная группа и ϵ-разложение. - М.: Мир, 1975. - 302 с.
3. Чалый А.В. Методы теории фазовых переходов в проблеме структурообразования // Теоретические и математические аспекты морфогенеза. - М.: Наука, 1987. - С. 245-255.
4. Chalyi A.V., Mezhinskii I.V., Sysoev V.M. The fluctuation mechanism of the formation of spatio-temporal structures in chemically active systems // Proc. Int. Workshop on Nonlinear and Turbulent Processes in Physics. - Gordon and Breach, New York, 1984. - P. 719-730.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука, 1982. - 620 с.
6. Лакоза Е.Л., Сысоев В.М., Чалый А.В. Критические флуктуации во внешних полях // Ж. эксперим. и теор. физики. - 1973. - 65. - С. 605-616.
7. Larsen S., Mountain R., Zwazig R. On the validity of the Lorentz-Lorenz equation near the critical point // J. Chem. Phys. - 1965. - 42. - P. 2187-2192.
8. Олейникова А.В., Цыганов Н.Л., Чалый А.В. Рефракция света вблизи критической точки с учетом эффектов пространственной диспер-

сии//Оптика и спектроскопия.-1984.-56,вып.6.-С.1066-1071.
9. Ситько С.П., Сугаков В.И. О роли спиновых состояний в белковых молекулах // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1984. - № 6. - С.65-69.

УДК 57.043

В.Б.Швед, В.Д.Бобрышев

КОНТРАСТИРОВАНИЕ ЗОН ХОЛОДОВОЙ НЕКРОТИЗАЦИИ В СОЧЕТАНИИ С МИКРОВОЛНОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Для локального необратимого разрушения биологической ткани,в том числе патологических новообразований, в медицинской практике широко распространена криодеструкция, т.е. замораживание ткани до температур, при которых их последующая реабилитация невозможна. В литературе хорошо отражены достоинства криохирургии, например высокая терапевтическая эффективность, активизация иммунологической системы, косметологический эффект.

Вместе с тем нетрудно показать, что для гарантированного разрушения патологических новообразований замораживанию последних будет сопутствовать значительное замораживание и переохлаждение окружающих здоровых тканей.

В данной работе предлагается использовать СВЧ излучение,предпочтительно миллиметрового (мм) диапазона, для снижения эффекта холодового повреждения здоровых тканей при криодеструкции.

Упрощенная математическая модель, описывающая процесс замораживания при криодеструкции, может быть представлена одномерной нестационарной задачей Стефана [1, 2]

$$(\lambda(u)/z(u)_u + [c(u)\rho(u) + \rho\delta(u-u^*)]z_t + w(u)z(u) = 0,$$

где $z = z(u,t)$ - искомая координата изотермы u из температурного интервала $u_A(t) \le u \le u_m$; t - время; $\lambda(u)$, $c(u)$, $\rho(u)$ - коэффициент теплопроводности, теплоемкости и плотности соответственно; $w(u)$ - мощность источника тепла; $\rho = \Lambda\rho$; Λ - скрытая теплота кристаллизации; $\delta[z - z^*(t)]$ - дельта-функция Дирака; $z^*(t)$, $z_m(t)$ - подлежащие определению подвижные координаты изотермы замораживания и биоткани соответственно; $u_A(t)$ - температура охлаждающей поверхности криоинструмента; u_n, u^*, u_m - температура криопоражения, замораживания, биологической ткани соответственно. При этом выполняются условия

$$u_A(t) < u < u_m, \quad t > 0, \quad u_A(0) \le u_n < u^*,$$

$$u_A < \bar{u} < u_m, \quad z(u,0) = z(u) = 0, \quad z[u_A(t), t] = 0,$$
$$z(u_m, t) = z_m(t), \quad z(u^*, t), \; z^*(t), \quad z_u = z_u(u_m, t) = +\infty.$$

В стационарном случае для плоской криодеструкции, принимая, что метаболизм в замороженной зоне отсутствует, а в незамороженной определяется как [1] $w(u) = w_0(u_m - u)$, задача имеет следующее аналитическое решение:

$$\tilde{z}_{(u)} = \begin{cases} (z_0 + l)(u^* - u_0)^{-1}(u - u_0) & \text{при} \quad u_0 \le u \le u^*, \\ (z_0 + l) + \sqrt{\dfrac{\lambda_m}{w_0}} \ln \dfrac{u_m - u^*}{u_m - u} & \text{при} \quad u^* \le u \le u_m. \end{cases} \qquad (1)$$

Выражение (1) решим относительно u:

$$u = \begin{cases} u_0 + \dfrac{z}{z_0 + l}(u^* - u_0) & \text{при} \quad z_0 \le z \le z_0 + l, \\ u_m - (u_m - u^*)e^{-\sqrt{\frac{w_0}{\lambda_m}}[z - (z_0 + l)]} & \text{при} \quad z \ge z_0 + l, \end{cases} \qquad (2)$$

где

$$l = \frac{\lambda_m(u^* - u_0)}{(u_m - u^*)\sqrt{\lambda_m w_0}} - z_0 .$$

Используя (2), оценим глубину дополнительного холодового поражения здоровых тканей при плоской криодеструкции локального участка головного мозга глубиной $5 \cdot 10^{-3}$ м. Нами использованы теплофизические характеристики, принятые в медицине [3]. Температура гарантированного криопоражения равна - 20°С [3], допустимая температура переохлаждения здоровых тканей мозга составляет 32,5 °С.

Согласно решению (2), получаем u_{A_3} = -33,6 °С, $z_0 + l$ = = $12,4 \cdot 10^{-3}$ м, $z_{np} = z_0 + l + 7,2 \times 10^{-3}$ м. Температурная картина, соответствующая этому случаю, представлена на рис. 1.

Таким образом, гарантированному криопоражению опухоли размером $5 \cdot 10^{-3}$ м сопутствует дополнительное повреждение здоровой ткани на глубину $14,6 \times 10^{-3}$ м.

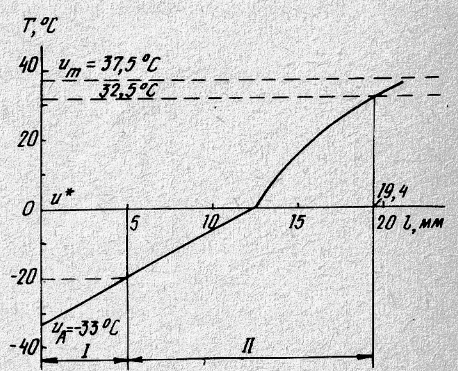


Рис.1.Стационарная температурная картина при плоской криодеструкции участка головного мозга глубиной $5 \cdot 10^{-3}$ м: I - зона гарантированного криопоражения; II - зона дополнительного холодового повреждения здоровых тканей

Рассмотрим такой процесс замораживания, когда сквозь замороженную зону осуществляется подвод СВЧ энергии.

Коэффициент поглощения в

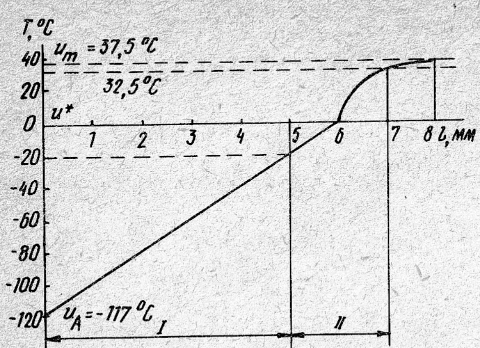


Рис.2. Стационарная температурная картина при плоской криодеструкции участка головного мозга глубиной 5 x x 10^{-3} м в случае подвода сквозь замороженную зону СВЧ излучения: I и II – см. рис. 1

замороженной зоне более чем на порядок ниже коэффициента поглощения в незамороженной ткани, поэтому в первом приближении считаем, что преобразование СВЧ энергии в тепловую осуществляется на границе незамороженной зоны. Пренебрегая энергией метаболизма по сравнению с СВЧ энергией и считая, что последняя выцеляется в ткани по закону $P = P_0 \exp \times [-\alpha(z - z^*)]$, где α^{-1} – глубина проникновения, приведем решение (2) к виду

$$\tilde{z}(u) = \begin{cases} l \dfrac{u - u_0}{u^* - u_0}, & u_0 \leq u \leq u^*, \\ & l = \dfrac{\lambda_1 (u^* - u_0)}{(u_m - u^*)\sqrt{\lambda_2 W_0}}. \\ l + \dfrac{\sqrt{\lambda_2}}{W_0} \ln \dfrac{u_m - u^*}{u_m - u}, & u^* \leq u \leq u_m, \end{cases} \qquad (3)$$

Из решения (3) следует, что при $P_0 d^{-e} / \lambda_2 = u_m - u^*$ получим уже на расстоянии $3/\alpha$ от границы замораживания 35 %-ное значение нормальной температуры ткани, т.е. практическое отсутствие переохлаждения. Поскольку $1/\alpha$ для СВЧ излучения в мм диапазоне составляет доли миллиметра, то введение СВЧ источника резко снижает эффект холодового повреждения здоровых тканей.

Оценим значение P_0 при $P_0 \alpha^{-2} / \lambda_2 = u_m - u^*$. Принимая $\lambda_2 = 0,52$ Вт/м·К, $u_m = 37,5$ °С, $u^* = 0$ °С, $1/\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ м (определяется выбором частоты СВЧ излучения и соответствует мм диапазону), получаем $P_0 \approx 4$ Вт/см^2.

На основании решения (3) оценим глубину дополнительного поражения здоровых тканей головного мозга при криодеструкции участка $5 \cdot 10^{-3}$ м в случае, когда сквозь замороженную зону подается СВЧ излучение мм диапазона с энергией $P_0 \alpha^{-2} / \lambda_m = u_m - u^*$ и глубиной проникновения $5 \cdot 10^{-4}$ м. В результате получаем $u_A = -117,5$ °С, $z_0 + l = 6,0$ мм, $z_{пр} = z_0 + l + 1,0$ мм. Температурная картина, соответствующая этому случаю, изображена на рис.2. Глубина дополнительного поражения составляет 2 мм.

Из рассмотренных частных случаев следует, что подвод СВЧ излучения сквозь замороженную зону значительно уменьшает дополнительное поражение здоровых тканей при криодеструкции новообразований.

1. Березовский А.А. Одномерная локальная задача Стефана плоскопараллельной криодеструкции биологической ткани // Задачи теплопроводности с подвижными границами. – Киев, 1985. – С.3–8.
2. Березовский А.А. Одномерные модели локального замораживания биоткани // Нелинейные задачи теплопроводности. – Киев, 1984. – С. 3–8.
3. Комини Г., Дель Джиудиче С. Тепловые аспекты криохирургии // Теплопередача. – 1976. – № 4. – С. 8–16.

УДК 577.3

Д.Г.Радченко, И.А.Слабкая

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ РАБОТЫ СИНАПСА КАК НЕРАВНОВЕСНОЙ СИСТЕМЫ, ВОСПРИИМЧИВОЙ К ВЛИЯНИЮ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

В условиях сильного отклонения от равновесия возникает качественно новый характер взаимодействия внешних физических полей с системой. Вблизи критических точек, так называемых точек бифуркации, система обладает рядом особенностей, одной из которых является аномальное возрастание восприимчивости к внешним воздействиям [1]. Однако априори не ясна степень применимости указанных результатов ко всему многообразию критических явлений в реальных системах.

В качестве реальной неравновесной ситуации в настоящей работе исследуется популяция ацетилхолиновых рецепторов в постсинаптической мембране – концевой пластинке. Основой рассмотрения является гипотеза о взаимосвязанности кратковременного изменения проводимости ионных каналов и так называемого фазового расслоения водно-белковой матрицы в примембранной области. По-видимому, впервые на связь между изменением проницаемости возбудимой нервной мембраны и состоянием воды обратил внимание И.М.Клотц [2]. Автор, как и многие другие исследователи, не рассматривал динамические и структурные аспекты процесса, тем более влияние физических полей. Однако нам кажется ценной и важной идея Клотца о способности воды образовывать кооперативные системы в гидратной оболочке белков и мембранах. Это явление лежит в основе процессов, происходящих на молекулярном уровне, но ведущих к макроскопическому результату, измеряемому как отклик рецепторной популяции.

В качестве базы для построения динамической модели выбирается часто используемая схема реакций бимолекулярных стадий [3]

$$A + R \underset{k_{-1}}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} AR^* \xrightarrow{k_3} P_A \; + \; R^* \xrightarrow{k_2} R,$$

где A – молекула ацетилхолина; R – рецептор в исходном состоянии; AR^* – комплекс ацетилхолин-рецептор; R^* – рецептор в активированном состоянии; P_A – продукт распада ацетилхолина под действием ацетилхолинэстеразы; k_1, k_{-1}, k_2, k_3 – коэффициенты скоростей реакции.

Приведем уравнения, описывающие кинетику этой реакции:

$$\dot{y} = d(r_0 - y)k_1 - k_3 y - k_{-1} y, \qquad (1)$$

$$\dot{x} = k_3 y - k_2 x, \qquad (2)$$

где x – концентрация R^*; y – концентрация AR^*; d – концентрация ацетилхолина; r_0 – начальная концентрация рецепторов.

При этом в общем виде описывается процесс кратковременного увеличения концентрации ацетилхолина в синаптической щели, в результате чего рецепторно-канальные молекулы переходят в активированное состояние, а затем, после быстрого удаления ацетилхолина (вследствие диффузии и действия эстеразы), релаксируют к исходному состоянию с дискретным изменением проводимости каналов.

Закономерным представляется то, что ионы затрачивают на прохождение канала $10^{-7} - 10^{-8}$ с, т.е. время, исключительно близкое к периоду обмена молекулы воды возле иона. По современным представлениям рецепторы как белковые структуры имеют динамическую водно-белковую матрицу. Движение белковых цепей происходит со временем корреляции $10^{-8} - 10^{-10}$ с. Этому способствует время τ_1 нахождения субъединицы рецептора в конформации, комплементарной ацетилхолину. При связывании ацетилхолин "фиксирует" эту конформацию на более продолжительное время. Происходят упорядочение водно-белковой матрицы, увеличение числа и изменение локализации доступных активных центров на поверхности субъединиц. При этом молекулам воды термодинамически выгодно находиться в виде упорядоченной кооперативной структуры (кластеров) с временем жизни $\geq 10^{-8}$ с [4], зависящим от свойств белка и внешних условий. Это время на несколько порядков больше, чем время жизни водородных связей в гомогенной жидкой воде: $10^{-11} - 10^{-12}$ с. Такое упорядоченное состояние можно классифицировать как открытое, реализуемое в процессе "растворения" субъединиц рецепторов с образованием канала. Одновременно с "растворением" повышается константа диссоциации комплекса рецептор – медиатор. В результате освободившиеся под действием молекулярного движения молекулы ацетилхолина гидролизуются (за 3 – 4 мкс) ацетилхолинэстеразой и не оказывают повторного действия.

Для данного рассмотрения важно, что при взаимном приспособлении конформации белка и воды конкуренция клатратации, гидратации и других взаимодействий в матрице приводит ее к неравновесному состоянию. Структурные элементы взаимодействующей с рецепторами воды в момент оккупации и после него становятся более многообразными, в том числе и с некомпенсированными дипольными моментами, характерными для клатратов [5]. Дальнодействие этого процесса за счет кооперативной перестройки водородных связей распространяется по меньшей мере на всю зону выброса кванта ацетилхолина, что позволяет при моделировании процесса перейти к макроскопическому описанию.

Таким образом, данная модель предполагает, что синхронное активирование ацетилхолином достаточно большой зоны рецепторной популяции является управляющим элементом для фазового перехода типа "расслоение – растворение" субъединиц рецептора. Эволюционно необходимость в таком фазовом переходе диктуется помехоустойчивым поведением типа "все или ничего" и высокой чувствительностью к управляющим параметрам – присутствию ацетилхолина и ионов.

О механизме выделения и удаления медиатора хорошо известно. Значительно меньшую роль обычно отводят второму параметру, определяющему, по нашему мнению, время релаксации открытой конформации рецепторов в нативных условиях. Существенно, что метод молекулярной динамики предсказывает затруднения движению ионов в направлении, перпендикулярном поверхности, структурирующей воду [6]. Таким образом, если подвижность одновалентных катионов вблизи устья канала в фазе "растворения" становится анизотропной, то открытие канала должно приводить на какое-то время к локальному обеднению концентрации ионов Na^+. Это, в свою очередь, приводит к увеличению белок-белкового взаимодействия [7], т.е. в рассматриваемой модели приводит к понижению растворимости субъединиц рецептора – "расслоению", происходящему со скоростью, пропорциональной k_2.

Образование структурно упорядоченной "измененной" воды – процесс кооперативный. Кинетическое действие процесса таково, что повышение концентрации x активированных рецепторов ускоряет дальнейшую диссоциацию AR^*. Эта положительная обратная связь за счет изменения полярных свойств среды учитывается в модели путем нелинейного представления коэффициента скорости k_3 диссоциации комплекса ацетилхолин – рецептор от концентрации x. Для описания такого эффекта раскладываем k_3 в ряд Тейлора по x:

$$k_3 = k_{30} + k_{31} x + k_{32} x^2 + O(x^3).$$

Поскольку скорость диссоциации комплекса возрастает с увеличением концентрации x, то величины k_{30}, k_{31}, k_{32} положительны. Подставив k_3 в (1), (2) и сложив их, получим дифференциальное уравнение для $z = x + y$:

$$\dot{z} = dk_1 r_0 - (dk_1 + k_{-1})z - (k_2 - dk_1 - k_1)x \qquad (3)$$

Введение переменной z позволяет исследовать поведение системы (1) и (2) в адиабатическом приближении [8]. При этом, согласно принципу подчинения, удается выразить y через x:

$$y = \frac{dk_1 r_0 - k_2 x}{dk_1 + k_{-1}}. \qquad (4)$$

Уравнение (4) применимо при условии

$$|\dot{x}|_{max} \ll \frac{dk_1 r_0 (dk_1 + k_{-1})}{dk_1 + k_{-1} - k_2} + (dk_1 + k_{-1})x .$$

Данное неравенство раскрывает смысл адиабатического приближения. Мы требуем, чтобы величина x изменялась достаточно медленно по сравнению с постоянной затухания ($dk_1 + k_{-1}$) и вторым слагаемым первой части неравенства. Поскольку рассматривается случай выброса кванта ацетилхолина, исходная величина d отлична от нуля. Это с учетом предельно высокой исходной концентрации рецепторов r_0, как и коэффициента скорости k_1 (обратно пропорционального τ_1), доказывает выполнимость приведенного условия.

Подставив (4) в уравнение (2), получим

$$\dot{x} = k_{30} r_0 \frac{dk_1}{dk_1 + k_{-1}} + \left(\frac{k_{31} r_0 dk_1 - k_{30} k_2}{dk_1 + k_{-1}} - k_2\right) x + \left(\frac{k_{32} r_0 dk_1 - k_{31} k_2}{dk_1 + k_{-1}}\right) x^2 + \frac{k_{32} k_2}{dk_1} x^3 . \qquad (5)$$

Существует аналогия между описанием термодинамических свойств бинарной жидкости в критической точке и фазовым переходом 2-го рода [9]. Исходя из этого уравнение (5) должно описывать переход типа "все или ничего" при существовании единственного значения $d = d_c$, причем правая часть уравнения, т.е. критическая линия фазового перехода, должна иметь три корня, совпадающих в точке неустойчивости d_c. Этому случаю соответствуют следующие ограничения на параметры:

$$k_2 - k_{31} r_0 < 0;$$

$$p\Big|_{d=d_c} = -\frac{1}{3}\left(\frac{k_{32} r_0 dk_1 - k_{31} k_2}{k_{32} k_2} \frac{dk_1}{dk_1 + k_{-1}}\right)^2 - \frac{dk_1(k_{31} r_0 - k_2) - k_{30} k_2 - k_2 k_{-1}}{k_{32} k_2} \frac{dk_1}{dk_1 + k_{-1}} = 0;$$

$$q\Big|_{d=d_c} = \frac{1}{27}\left(\frac{k_{32} r_0 dk_1 - k_{31} k_2}{k_{32}} \frac{dk_1}{dk_1 + k_{-1}}\right)^3 - \frac{k_{30} r_0 (dk_1)^2}{k_{32} k_2 (dk_1 + k_{-1})} = 0 .$$

При этих ограничениях стационарное решение уравнения (5) в точке $d = d_c$ имеет вид

$$x_c = \frac{1}{3} \frac{d_c k_1 k_{32} r_0 - k_{31} k_2}{k_{32} k_2} \frac{dk_1}{dk_1 + k_{-1}} .$$

Далее аналогично подходу, использованному в работе [10] при описании взаимодействия фармакологических веществ с рецепторной популяцией, критическое поведение системы выражается через отклонение от стационарного значения - параметр порядка $\bar{x} = x - x_c$. С помощью параметра порядка можно дать единое описание кинетики процессов при фазовых переходах как своеобразного броуновского движения. При этом аналогом броуновских частиц выступает термодинамическая функция x, ответственная за фазовый переход. По физическому смыслу параметр порядка - это корреляционная функция, определяющая степень дальнего порядка в системе.

Запишем уравнение для отклонения $\bar{x}$ в следующем виде:

$$\dot{\bar{x}} = F(x_c) + \frac{\partial F(x_c)}{\partial x} \bar{x} + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F(x_c)}{\partial x^2} \bar{x}^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 F(x_c)}{\partial x^3} \bar{x}^3 , \qquad (6)$$

где $F(x)$ - правая часть уравнения (5); $F(x_c) = 0$;

$$\frac{\partial F(x_c)}{\partial x} = \frac{dk_1(k_{31} r_0 - k_2) - k_{30} k_2 - k_2 k_{-1}}{dk_1 + k_{-1}} + \frac{1}{3} \frac{(dk_1 k_{32} r_0 - k_{31} k_2)^2 dk_1}{k_{32} k_2 (dk_1 + k_{-1})^2} = -p \frac{k_{32} k_2}{dk_1};$$

$$\frac{\partial^2 F(x_c)}{\partial x^2} = 0; \qquad \frac{\partial^3 F(x_c)}{\partial x^3} = -6 \frac{k_{32} k_2}{dk_1}$$

Из анализа на устойчивость решения уравнения (6) по линейному приближению видно, что потеря устойчивости происходит при достижении $d = d_c$, где $\frac{\partial F(x_c)}{\partial x}\Big|_{d=d_c} p(d_c) = 0$. Тогда при d, находящемся вблизи d_c, отбрасывая члены более высокого порядка по $d - d_c$, имеем

$$\frac{\partial F(x_c)}{\partial x} \approx \frac{\partial^2 F(x_c)}{\partial x \partial d}(d - d_c) = \left[\frac{k_{-1} k_1 k_{31} r_0 + k_{50} k_2 k_1}{(d_c k_1 + k_{-1})^2} + \frac{d_c k_1 k_{32} r_0 (d_c k_1 + k_{-1})}{(d_c k_1 + k_{-1})^3}\right](d - d_c) = f(k_{i,j}, r_0, d_c)(d - d_c).$$

Затем уравнение (6) можно переписать в виде

$$\dot{\bar{x}} = f(k_{i,j}; r_0, d_c)(d - d_c)\bar{x} - \frac{k_{32} k_2}{dk_1} \bar{x}^3 . \qquad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что при $d < d_c$, $\bar{x} = 0$ – устойчивое решение, а при $d > d_c$

$$\bar{x} = \left[\frac{f(k_{i,j}, r_0, d_c)(d-d_c)d_c k_1}{k_{32} k_2} \right]^{1/2}.$$

Следовательно, для получения взрывной реакции типа перехода "все или ничего" необходимо незначительное удельное изменение концентрации ацетилхолина относительно критической. Таким образом, обеспечивается активация около 2000 рецепторов за 300 мкс при кратковременном выбросе кванта ацетилхолина.

Изучение взаимодействия вещества с холинорецепторами затруднено отсутствием линейной зависимости между концентрацией активного комплекса, определяемого по величине эффекта, и величиной эффекта. Для агонистов только в узком диапазоне концентраций сохраняется пропорциональная зависимость между эффектом и количеством агонист-рецепторных комплексов. Для конкретного экспериментального подтверждения критического типа поведения необходимо систематическое изучение окрестности излома кривых доза – эффект и изменение исходной модели при интерпретации результатов исследований шума мембранного потенциала. В то же время сам ход этих кривых, имеющих, как известно, сигмоидальную форму, уже указывает на кооперативность процесса. Еще более убедительными подтверждениями кооперативного взаимодействия рецепторной популяции являются такого рода факты, когда одна молекула налорфина "выводит из строя" десятки молекул морфия.

Данный подход позволяет объяснить не только механизм такой эффективности путем дальнодействующего изменения структуры воды и констант диссоциации для агонистов и антагонистов, но и принципы первичной рецепции слабых физических полей.

Дальнейшее обсуждение роли кооперации и флуктуаций в рецепции поля опирается на универсальное описание термодинамических свойств вблизи фазовых переходов 2-го рода. В качестве примера рассмотрим взаимодействие электромагнитного излучения (ЭМИ) с рецепторной популяцией. В этом случае изменяемая в процессе расслоения – растворения структура поверхностной воды может играть важную роль в качестве диспергирующей среды в следующей цепочке событий.

Первичным микроскопическим эффектом при фазовом переходе водно-белковой матрицы (в отличие от льдоподобной структуры) является скачок дипольного момента в структурных элементах клатратной воды. Кооперативность процессов в зоне, активированной квантом ацетилхолина, будет приводить к макроскопически синфазному реаги-

рованию на внешнее воздействие. Можно ожидать, что суммарный дипольный момент M окажется пропорциональным квадрату радиуса ρ активированной зоны. Кроме того, изменение диэлектрической проницаемости активированной зоны в процессе связывания воды ответственно за появление локальных градиентов ∇E тангенциальной электрической составляющей ЭМИ. Локальные концентрации поля могут достигать нескольких порядков на частотах, превышающих частоту дебаевской релаксации связанной воды. При этом не может сформироваться сколь-нибудь значительный нагрев из-за преобладания теплоотдачи в окружающую среду. Это справедливо и для окрестности критической точки, так как в ней теплопроводность остается неизменной или даже возрастает [9]. Реальностью остаются только весьма высокие градиенты поля на границах зон. Нетрудно показать [11], что градиент E также пропорционален ρ^2. Наличие суммарного дипольного момента и локального градиента поля является, согласно классическим представлениям, причиной возникновения втягивающей силы $F \sim M \nabla E$. Поскольку корреляция охватывает ~ 1000 рецепторов, размер активированной зоны не менее чем в $\sqrt{1000}$ раз превышает эффективный размер ρ_0 случайно оккупированного рецептора. Таким образом, по сравнению с некоррелированным возбуждением рецепторов кратковременный выброс и удаление кванта ацетилхолина должны сопровождаться возрастанием и последующей релаксацией индуцированной полем втягивающей силы. Она растет как $(\rho/\rho_0)^4$, повышаясь в указанных условиях на шесть порядков. Время релаксации τ по сравнению со средним временем жизни возбужденного единичного рецептора в классическом приближении должно возрастать пропорционально объему, т.е. для плоской модели как $(\rho/\rho_0)^2$. Однако, как уже указывалось, $\tau \sim k_2^{-1}$ ограничивается локальным обеднением концентрации Na^+ и характеризуется значением от единиц до десятков миллисекунд.

Втягивающая сила должна вызывать латеральную диффузию активированной зоны, если только данный процесс не ослабляется известным уменьшением коэффициента диффузии D вблизи критической точки. Например, для диффузионного потока, вызванного только градиентом концентрации, как правило, наблюдается аномальное замедление, пропорциональное D. Однако для потока, вызванного градиентом давления ∇P, ситуация диаметрально противоположная. Бародиффузионный поток равен произведению D, ∇P и кинетического сингулярного коэффициента L [9]. Произведение LD пропорционально критическому радиусу корреляции ρ_c с показателем степени η от 1 (классическая теория) до 3/4 (плоская модель Изинга).

Формально радиус корреляции (а соответственно и диффузионный поток) стремится к ∞ при приближении к критической точке ($d = d_c$). В реальных системах ограничения накладывают их характерные размеры – в нашем случае радиус ρ зоны, активированной квантом ацетилхолина. Согласно принципу масштабной инвариантности при $\rho \ll \rho_c$, все кинетические характеристики перенормируются заменой ρ_c на ρ.

Следовательно, характер сингулярности рассматриваемого явления в целом описывается таким образом. Учитывая, что $\nabla P \sim F \sim \rho^4$, $LD \sim \rho^2$, искомый бародиффузионный поток расходится как $(\rho/\rho_0)^{4+\ell}$. Полученная оценка указывает на аномальное возрастание индуцированной внешним полем кинетической подвижности активированных зон. При определенных условиях возможна их латеральная диффузия путем последовательной кооперативной перестройки водно-белковой матрицы по градиенту поля.

Рассмотренный эффект аномального возрастания восприимчивости системы при ее активации квантами ацетилхолина потенциально может быть ответственным за следующие события:

1. Индуцированное слияние с активированной зоной мелкомасштабных, короткоживущих, но возникающих с большей вероятностью флуктуаций параметра порядка водно-белковой матрицы. Результат такого процесса – рост времени релаксации и, следовательно, изменение параметров миниатюрного потенциала концевой пластинки (МПКП).

2. Изменение характеристик мембранного шума при малых концентрациях ацетилхолина в синаптической щели за счет нарушения статистически независимого процесса открывания одиночных каналов (подтверждено экспериментально).

3. "Размытие" активированной зоны в направлении градиента внешней, тангенциальной к плоскости мембраны E – компоненты пол Результат – изменение параметров МПКП.

Любое из указанных событий биологически значимо и может интерпретироваться как конечное звено первичной рецепции поля.

Таким образом, на примере ацетилхолин-рецепторного комплекса показан возможный механизм работы синапса как неравновесной системы, восприимчивой к влиянию внешних полей.

Специфика взаимодействия подобных неравновесных сред с полями заслуживает, на наш взгляд, дальнейшего изучения.

1. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – М.: Прогресс, 1986. – 100 с.
2. Клотц И.М. Вода. // Горизонты биохимии. – М.: Наука, 1964. – С. 399–410.
3. Сергеев П.В., Шимановский Н.Л. Рецепторы физиологически активных веществ. – М.: Медицина, 1987. – 100 с.
4. Кяйвяряйнен А.И. Динамическое поведение белков в водной среде и их функции. – Л.: Наука, 1980. – 100 с.

5. Габуда С.П. Связанная вода. Факты и гипотезы. – Новосибирск: Наука, 1982. – 100 с.
6. Антонченко В.Я. Физика воды. – Киев: Наук.думка, 1986. – 100 с.
7. Основы биохимии: В 2 кн. / А.Уайт, Ф.Хендлер, Э.Смит и др. – М.: Мир, 1981. – Кн. 1. – 100 с.
8. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 100 с.
9. Анисимов М.А. Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
10. Зеезе А., Магер П.П. Простые системы с обратной связью, используемые для моделирования взаимодействия лекарств с рецепторами // Термодинамика и регуляция биологических процессов. – М.: Наука, 1984. – С. 125–135.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 100 с.

УДК 537.868.536:577.3.08

А.Г.Ордынец

АБСОРБЦИОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Проблема изучения эффектов резонансного взаимодействия биообъектов с электромагнитным излучением (ЭМИ) на клеточном и более высоком уровнях организации носит фундаментальный характер [1]. Поиск частотных особенностей в миллиметровом (мм) диапазоне длин волн на этих уровнях проводился лишь косвенно путем регистрации физиологического отклика [2–4]. В силу принципиального отсутствия жесткой детерминации таких откликов с параметрами внешних излучений низкой энергии более предпочтительно обнаружение дисперсии первичных физико-химических эффектов *in vivo*. Существующими физическими методами зарегистрировать обнаруженные частотные особенности пока не удается [3]. Связано это, по-видимому, с тем, что использовавшиеся системы регистрации в условиях эксперимента обладают разрешающей способностью порядка 1 % поглощенной мощности на преобладающем "неселективном" фоне поглощения молекулами воды.

Для выяснения первичных селективных механизмов рецепции ЭМИ биообъектами необходима разработка новых абсорбционных спектральных методов. Цель данной работы – разработка метода, отвечающего следующим требованиям: достаточно высокая чувствительность; непосредственное определение дисперсии локально поглощаемой части мощности на преобладающем на несколько порядков неселективном фоне; неразрушающий и невоздействующий на функциональное состояние исследуемого биообъекта принцип съема информации: широкополосность (всеволновость).

В основу метода положена регистрация с помощью оптико-акустической (ОА) камеры локальных тепловых процессов, сопровождающих, как будет показано ниже, взаимодействие частотно-модулированного

(ЧМ) излучения со спектрально-неоднородной средой. Теория подобного эффекта для амплитудно-модулированного (АМ) излучения развита в работе Розенцвейга и Герша [5]. В рассматриваемом случае подход данных авторов следует дополнить учетом свойства дисперсной среды преобразовывать ЧМ в АМ излучение. Рассмотрим это более подробно в приближении $\Delta\nu \ll \Gamma$ ($\Delta\nu$ - девиация частоты; Γ - полуширина резонансной кривой поглощения). Предполагая закон изменения несущей частоты ЭМИ в виде $\omega = \bar{\omega} + \Delta\nu \sin\Omega t$, интенсивность излучения, распространяющегося в анализируемой среде, можно представить в виде

$$J(x,\omega,t) = J(x,\bar{\omega}) + \left.\frac{\partial J(x,\omega)}{\partial\omega}\right|_{\omega=\bar{\omega}} \Delta\nu \sin\Omega t + \frac{1}{2}\left.\frac{\partial^2 J(x,\omega)}{\partial\omega^2}\right|_{\omega=\bar{\omega}} \Delta\nu^2 \sin^2\Omega t + \cdots, \qquad (1)$$

где x - координата, отсчитываемая в отрицательную полуплоскость от поверхности исследуемой среды.

Выделяя в результирующем ОА сигнале только первую гармонику частоты модуляции Ω и учитывая экспоненциальную зависимость $J(x,\omega) = J_0 \exp(\beta x)$, где $\beta = \beta_0 + \beta_1(\omega)$, β_0, $\beta_1(\omega)$ - коэффициенты затухания слабодисперсной части среды (воды) и спектрально-неоднородного включения, для плотности мощности тепловых источников имеем

$$W(x,\omega,t) = \beta x J_0 \left.\frac{\partial\beta_1(\omega)}{\partial\omega}\right|_{\omega=\bar{\omega}} \exp(\beta x)\Delta\nu \sin\Omega t. \qquad (2)$$

Подставив (2) в уравнение тепловой диффузии и решив его при тех же предположениях, что и в работе [5], для амплитуды ОА сигнала получим

$$Q = \frac{\gamma P_0 \beta J_0 \Delta\nu \left.\frac{\partial\beta_1(\omega)}{\partial\omega}\right|_{\omega=\bar{\omega}}}{\sqrt{2}\, l_g a_g T_0 k_s (\sigma^2 - \beta^2)} \times$$

$$\times \left\{ \frac{(b+1)\left(\frac{1-r}{1+r}\right)\exp(\sigma_s l) - (b-1)\left(\frac{1+r}{1-r}\right)\exp(-\sigma_s l)}{(g+1)(b+1)\exp(\sigma_s l) - (g-1)(b-1)\exp(-\sigma_s l)} + \right.$$

$$\left. + \frac{2\left[\frac{2br}{1-r^2} - \frac{1+r^2}{1-r} + l\sigma_s(r-b)\right]\exp(-\beta l)}{(g+1)(b+1)\exp(\sigma_s l) - (g-1)(b-1)\exp(-\sigma_s l)} \right\}. \qquad (3)$$

Здесь $\gamma = C_p / C_V$ - отношение теплоемкостей для газа, заполняющего ОА камеру; P_0 и T_0 - давление и температура газа; l_g - толщи-

на слоя газа; ρ_i, C_i, k_i - плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности (i принимает значения: S - параметры образца; g - газа; b - подложки); l - толщина оразца; $a_i = \left(\frac{\rho_i C_i \Omega}{2k_i}\right)^{1/2}$ - коэффициент термической диффузии среды i ; $\sigma_s = (1+j)a_s$, j - мнимая единица; $b = \frac{k_b a_b}{k_s a_s}$; $g = \frac{k_g a_g}{k_s a_s}$; $r = (1-j)\frac{\beta}{2a_s} = \frac{\beta}{\sigma_s}$.

Если в качестве образца выбирается биообъект *in vivo*, "подложка" отсутствует, следовательно, $b \equiv 1$. Учитывая также, что обычно $g < 10^{-2}$, а $\sigma_s l \gg 1$, из (3) получаем более простое и удобное выражение для амплитуды ОА сигнала:

$$Q = \frac{\gamma P_0 \beta J_0 \Delta\nu}{\sqrt{2}\, l_g a_g T_0 k_s \sigma_s (\sigma_s + \beta)^2} \left.\frac{\partial\beta_1(\omega)}{\partial\omega}\right|_{\omega=\bar{\omega}}. \qquad (4)$$

Анализ выражения (4) позволяет раскрыть ряд особенностей метода.

Пропорциональность выходного сигнала интенсивности ЭМИ характеризует линейность метода в большом динамическом диапазоне и "нулевой" принцип измерений. Другими словами, если анализируемая среда не обладает дисперсией и отсутствует перазитная амплитудная модуляция на первой гармонике, то амплитуда ОА сигнала тождественно равна нулю. Изменение фазы ОА сигнала на π (знака $\left.\frac{\partial\beta_1(\omega)}{\partial\omega}\right|_{\omega=\bar{\omega}}$) при смещении рабочей точки с одного склона резонансной кривой на другой может служить надежным критерием при изучении резонансных эффектов на преобладающем фоне неселективного или монотонно зависящего от частоты поглощения. Степень "контрастирования" сигнала пропорциональна крутизне частотной зависимости коэффициента затухания β и для "добротностей" $\sim 10^4$ [6] может давать соответствующий выигрыш по сравнению со слабой дисперсией гомогенной воды. Изменение характера зависимости выходного сигнала как функции частоты модуляции Ω от Ω^{-1} до Ω^{-2} при изменении знака неравенства между глубиной проникновения излучения β^{-1} и длиной тепловой диффузии a_s^{-1} (в пределах которой формируется ОА сигнал) позволяет дополнительно по сравнению с [7] повысить точность измерения.

С использованием частот модуляции от 10^{-1} до 10^2 Гц можно при наличии дисперсии поглощения в анализируемых задачах получить информацию о физических характеристиках слоев биосреды, прилегающих к поверхности облучения на расстоянии от 10^{-4} до 1 мм.

Выходной сигнал слабо зависит от абсолютного значения несущей частоты при условии $\beta_0 \gg \beta_1(\omega)$ (всеволновость) и определяется только расстройкой и величиной Г, характеризующими крутизну $\left.\frac{\partial\beta_1(\omega)}{\partial\omega}\right|_{\omega=\bar{\omega}}$.

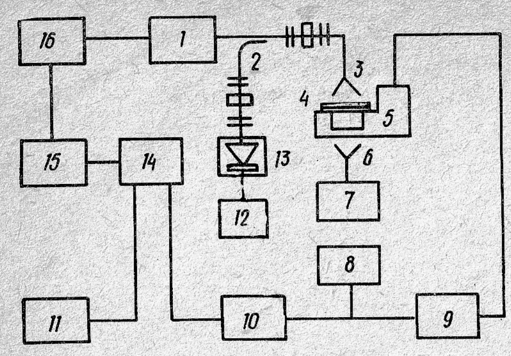


Рис.1. Блок-схема измерительной установки:
6 - рупорная антенна; 8, 12 - осциллографы; 9 - предварительный усилитель; 10 - усилитель мощности; 16 - модулятор

Определенным ограничением возможностей метода на первой гармонике является то, что при использовании стандартных генераторов частотную модуляцию, как правило, сопровождает паразитная амплитудная модуляция. Последняя приводит к наличию фонового сигнала, так как вызывает ОА эффект даже в неселективных, поглощающих средах. Кроме чисто аппаратурных способов устранения вклада паразитной амплитудной модуляции существует и более принципиальный путь - использование гармонического закона модуляции и выделение не первой, а второй гармоники ОА сигнала. Несмотря на некоторое снижение полезного сигнала ($\sim \frac{\Delta\nu}{\Gamma}$, причем для лоренцовской формы контура поглощения $\left(\frac{\Delta\nu}{\Gamma}\right)_{opt} \approx \frac{1}{3}$ [8]), происходит дополнительное повышение "контрастности" вклада "резонансов" по отношению к слабодисперсному фону. Наиболее существенным преимуществом является отсутствие в спектре боковых частот паразитной амплитудной модуляции гармоник $\mathcal{F}$, что позволяет реализовать предельную чувствительность метода, ограничиваемую в этом случае лишь собственным шумом ОА камеры и предусилителем.

Оценки "контрастности" метода по первой и второй гармоникам можно получить, сравнив $\left.\frac{\partial\beta(\omega)}{\partial\omega}\right|_{\omega=\bar{\omega}}$ и $\left.\frac{\partial^2\beta(\omega)}{\partial\omega^2}\right|_{\omega=\bar{\omega}}$ для дисперсионной кривой воды в мм диапазоне длин волн и лоренцовского контура с добротностью $10^3 - 10^4$. При этом для первой гармоники значение "контрастности" составляет $3\cdot10^2 - 3\cdot10^3$, а для второй - $10^5 - 10^7$.

Экспериментальная проверка основных идей проводилась с помощью измерительной установки (рис.1). Излучение от генератора 1 (КВЧ Г4-156), модулированное по частоте, через рупорную антенну 3 направлялось на объект 4, представляющий собой тонкую ($h \ll$ $\ll 200$ мкм) стеклянную кювету, заполненную дистиллированной водой. ОА сигнал, возникающий в воде, передавался через термически тонкое входное окно в камеру ОА датчика 5 собственной конструкции и приводил к колебаниям в ней давления газа с частотами, кратными частоте модуляции. Выходной сигнал чувствительного микрофона регистрировался с помощью многоканального анализатора 15 ($NTA = 1024$)

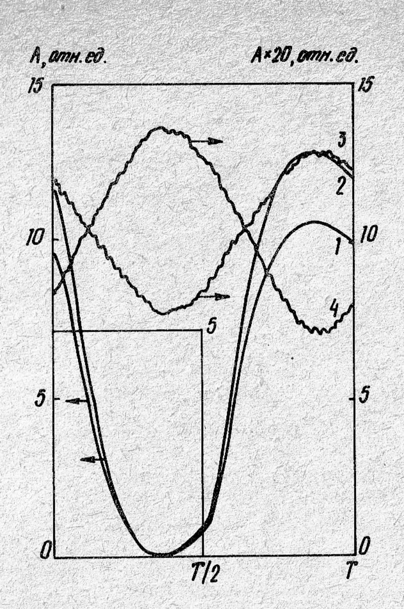


Рис.2. Изменение амплитуды сигнала за период модуляции (F = 1 Гц; P = 3 мВт - мощность падающего излучения): 1 - АМ, F = 35,84 ГГц; 2 - АМ, F = 35,78 ГГц; 3 - ЧМ, $\Delta\nu$ = 4,5 МГц, F=35,78 ГГц; 4 - ЧМ, $\Delta\nu$ = 4,5 МГц, F = = 35,84 ГГц; 5 - модулирующий меандр

Рис.3. Зависимость амплитуды ОА сигнала (1) и величины отраженной мощности (2) от частоты ЭМИ при ЧМ:
$\mathcal{F}$ = 1 Гц; $\Delta\nu$ = 3,5-5 МГц; Р = 5 мВт

и фиксировался на самописце 11. Управление установкой осуществлялось от микро-ЭВМ 666 В (14). Величины прошедшей мощности контролировались с помощью измерителя 7 плотности потока мощности П3-9, а отраженный сигнал - с помощью направленного ответвителя 2 и детекторной секции.

Характерный вид кривых ОА сигнала за один период приведен на рис. 2. Зависимости 1 и 2 соответствуют случаю АМ, 3 и 4 - ЧМ в масштабе 20:1.

На рис.3 представлена частотная зависимость амплитуды ОА сигнала в режиме ЧМ. Выходная мощность генератора < 5 мВт, частота модуляции - 1 Гц, девиация несущей частоты - 3,5-5 мГц. Вклад паразитной АМ устранялся путем вычитания ОА сигналов, полученных при использовании согласующей диэлектрической пластинки (на наружной поверхности воды) и без нее. Основная составляющая погрешности измерений определялась неточностью установки несущей частоты генератора. Отрицательное значение амплитуд на кривой 1 рис.3 соответствует сдвигу фазы ОА сигнала π, кривая 2 иллюстрирует синхронное

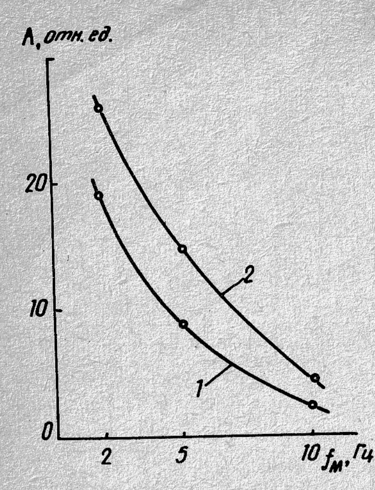


Рис.4. Амплитуда ОА сигнала в функции частоты модуляции:
P = 1 мВт; F = 22 ГГц; 1 – нормальный эпидермис; 2 – увлажненный эпидермис

изменение отраженной мощности, регистрируемое в частотном диапазоне, оптимальном для конкретного направленного ответвителя.

Экстремумы на кривой 1 отвечают точкам максимальной крутизны резонансной кривой. Определяя расстояние между ними, можно найти среднюю по ансамблю добротность ($\approx$400). Наличие эквидистантных резонансов свидетельствует об образовании стоячей волны в волноводном тракте между кюветой с водой и генератором. Благодаря большому продольному индексу повышается критичность к набегу фазы при изменении частоты, что является причиной полученного довольно высокого значения добротности.

Можно сделать два вывода. Во-первых, разрешающая способность измерений селективного поглощения на слабоселективном фоне была в данном эксперименте $\sim 10^{-3}$, что само по себе является новым результатом. При использовании данного метода к задачам идентификации "резонансов" с добротностью, близкой к 10^4, разрешающая способность конкретной установки автоматически улучшается еще на порядок. Во-вторых, обнаружение по физиологическому отклику резонансов, подобных представленным выше, может служить источником ряда ошибочных утверждений. Поэтому представленный метод является метрологической перспективой при отделении артефактов в задачах исследования локального резонансного взаимодействия ЭМИ с организмами.

Применимость метода к исследованию поглощения *in vivo* подтверждается экспериментом (рис.4). Здесь зависимости амплитуды ОА сигнала при АМ сняты в функции частоты модуляции f_M для двух случаев: 1 – кожа человека в нормальных условиях; 2 – кожа человека в течение 5 мин находилась в контакте с водой и затем насухо вытиралась. Отношение амплитуд для соответствующих f_M показывает, что при высоких частотах (малых глубинах анализируемого слоя) оно одинаково и равно 1,67, а при низких частотах уменьшается до 1,37. Это свидетельствует о возможности регистрации профиля распределения воды в коже.

1. Fröhlich H. The biological effects of microwaves and related questions // Adv. Electron. and Electron Phis. - 1980. - 53.- P. 85–102.

. Андреев Е.А., Белый М.У., Сытько С.П. Реакция организма человека на электромагнитное излучение миллиметрового диапазона // Вестн. АН СССР. - 1985. - № 1. - С. 24–32.

3. Физические основы микроволновой (биорезонансной) коррекции физиологического состояния организма человека / Е.А.Андреев, М.У.Белый, В.А.Куценюк и др. // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. – М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1985. - С. 58–85.

4. Резонансный характер воздействия радиоволн миллиметрового диапазона на биологические системы / Л.А.Севастьянова, А.Г.Бородкина, Э.С.Зубенкова // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. – М., 1983. - С. 34–47.

6. Rosencwaig A., Gersho A. Theory of the photoacoustic effect with solids // J. Appl. Phys. - 1976. - 47, N 1. - P. 64–69.

7. Голант М.Б. Биологические и физические факторы, обусловливающие влияние монохроматических электромагнитных излучений миллиметрового диапазона малой мощности на жизнедеятельность // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. – М., 1985. - С. 21–36.

7. Винокуров С.А. Определение оптических и теплофизических характеристик конденсированных сред оптико-акустическим методом // Ж. прикл. спектроскопии. - 1985. - 42, вып. 1. - С. 5–16.

8. Перегуд Е.А., Горелик Д.О. Инструментальные методы контроля загрязнения атмосферы. – Л.: Химия, 1981. - 384 с.

УДК 615.47:537.811:616.3

В.И.Соломонов, О.И.Писанко, А.Е.Мосежный, Г.И.Кириченко, В.П.Туранский

ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КВЧ ДИАПАЗОНА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОЖНЫХ ПОКРОВОВ

Оптические характеристики кожных покровов, в частности спектр поглощения, применяются для оценки периферического кровотока. Известны работы [1] по определению концентрации гемоглобина в различных биологических тканях, таких, как кожные покровы, слизистая оболочка желудочно-кишечного тракта, ткань печени. Содержание гемоглобина в поврежденных живых тканях коррелирует с кровотоком и позволяет количественно оценить степень кровонаполнения. Вместе с тем в механизме биологической реакции в результате различных воздействий происходят изменения периферического кровотока. Поэтому метод прижизненной спектрометрии кожных покровов применен нами для уточнения характера направленного действия низкоинтенсивного (< 10 мВт/см^2) электромагнитного излучения (ЭМИ) КВЧ диапазона на биологически активные точки (БАТ).

В последние годы низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ диапазона широко

применяется как в медико-биологических исследованиях, так и в практическом здравоохранении [2]. В работах [3, 4] показано, что излучение КВЧ диапазона действует на организм человека через БАТ, которые обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям и регулируют вегетативные реакции организма. Однако до сих пор остается неясным характер взаимодействия ЭМИ КВЧ диапазона с БАТ.

Цель настоящей работы - уточнение характера изменений оптических свойств кожного покрова в зоне БАТ под действием низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона.

Для исследований была отобрана группа добровольцев (20 практически здоровых мужчин). Средний возраст испытуемых 29 лет. Исследования проводились с утра, натощак, в одно и то же время.

Методика эксперимента следующая. У испытуемого регистрировали спектр поглощения кожи в зоне БАТ в течение 10 мин. После этого осуществлялось воздействие ЭМИ на фиксированной длине волны порядка 5,6 мм с уровнем выходной мощности 2-3 мВт/см^2 на БАТ-CL4 ("ХЕ-IУ") в течение 10 мин с одновременной регистрацией спектра поглощения в зоне левой или правой точки "ХЭ-IУ". По окончании воздействия ЭМИ на БАТ спектры поглощения регистрировались с зоны правой или левой точки в течение 10 мин.

В качестве источника низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона применялся экспериментальный образец аппарата "Электроника КВЧ-01" [5], обеспечивающий: работу на фиксированной длине волны ЭМИ - 5,6 мм; уровень мощности ЭМИ на выходе излучателя - 5 мВт; режим генерации - непрерывный; вид излучателя - диэлектрическая штыревая антенна.

Спектр поглощения в зоне БАТ получали на аппаратуре по методике, изложенной в работе [6]. На рис.1 приведены спектры поглощения, снятые с зоны левой БАТ "ХЭ-IУ" при воздействии низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ диапазона на симметричную правую БАТ "ХЭ-IУ". Из рисунка видно, что при воздействии излучения на правую БАТ в зоне левой БАТ отмечается снижение поглощения в широкой области спектра с выраженным на 9,6±1,5 % максимумом на длине волны 610 нм.

На рис.2 представлены спектры поглощения, снятые с зоны правой БАТ "ХЭ-IУ" при воздействии ЭМИ КВЧ диапазона на эту же точку. Видно, что под воздействием излучения в точке "ХЭ-IУ" происходит увеличение поглощения в широкой области спектра с максимумом 26,9± ± 1,5 % на длине волны 610 нм.

На рис.3 приведены спектры поглощения, снятые с зоны правой БАТ "ХЭ-IУ", на которую был сориентирован излучатель аппарата "Электроника КВЧ", но излучение на его выходе отсутствовало. Как видно из рисунка, спектры поглощения оставались неизменными в процессе всего эксперимента.

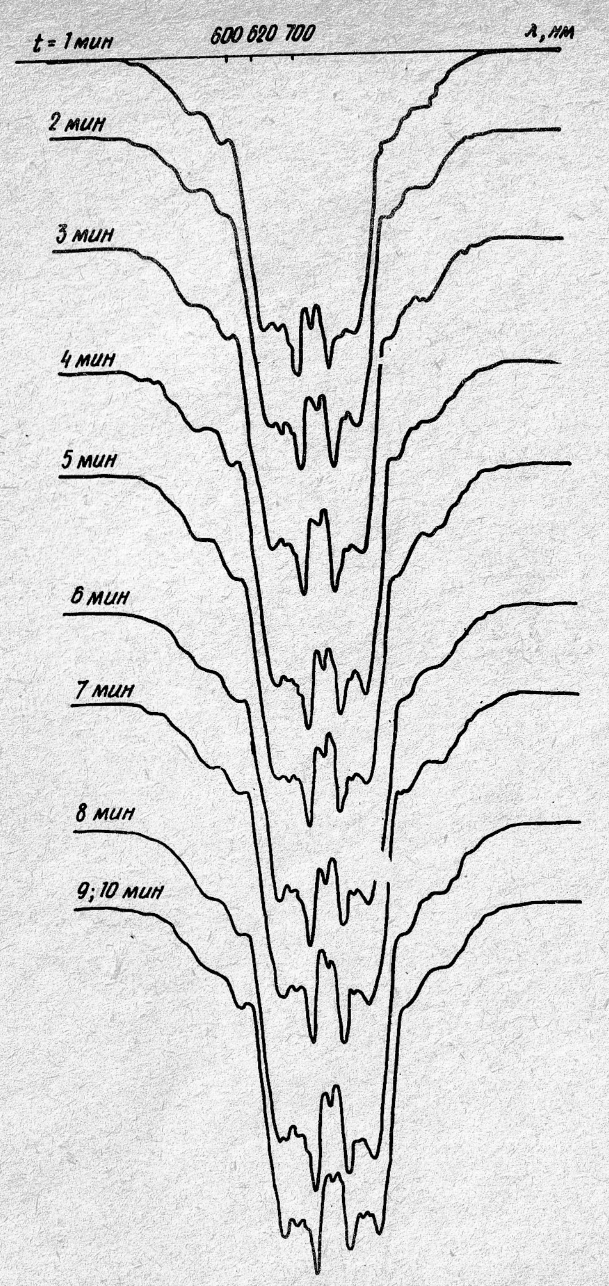


Рис.1. Спектры поглощения, снятые с зоны левой БАТ

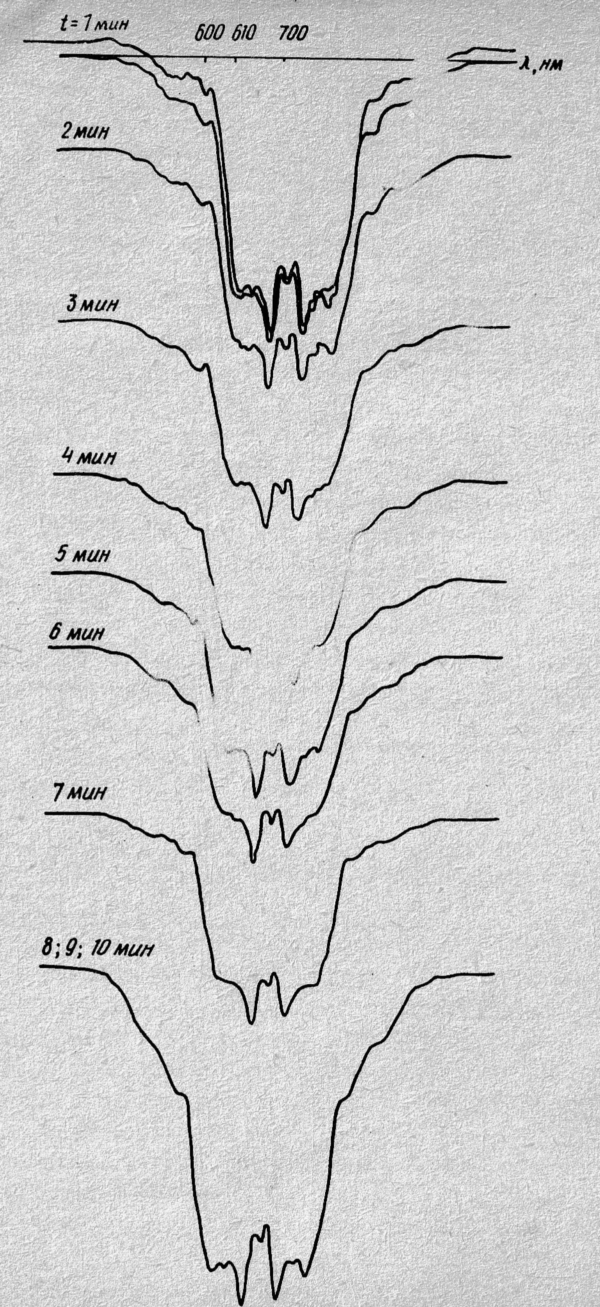


Рис. 2. Спектры поглощения, снятые с зоны правой БАТ

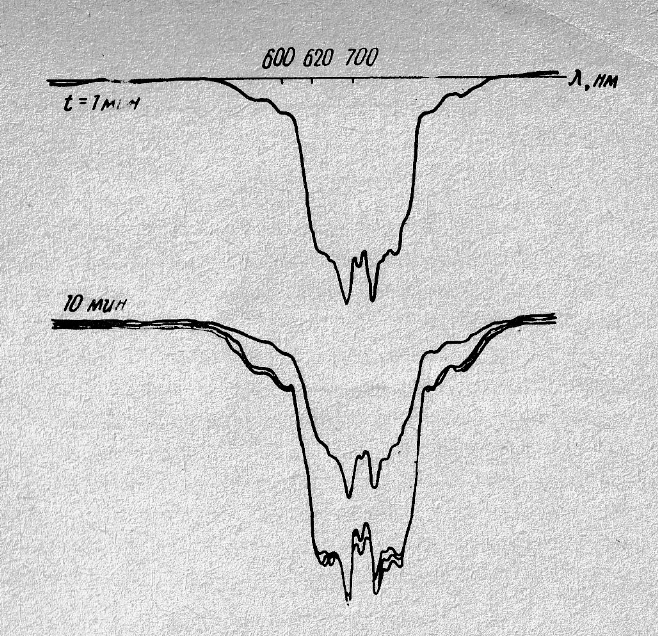


Рис.3. Спектры поглощения, снятые с зоны правой БАТ

На основании полученных данных можно сделать предварительный вывод о том, что воздействие низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ диапазона на БАТ вызывает непосредственно в зоне воздействия и в симметричной ей точке изменения оптических характеристик кожного покрова.

Предложенная методика может быть использована для контроля за воздействием ЭМИ КВЧ диапазона на живые организмы.

1. Биофизика / Ю.А.Владимиров, Д.И.Ратуркин, А.Я.Потапенко и др.- М.: Медицина, 1983. - 36 с.
2. Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1985. - 284 с.
3. Андреев Е.А., Белый М.У., Ситько С.П. Реакция организма человека на электромагнитное излучение миллиметрового диапазона // Вестн. АН СССР. - 1985. - Вып. 1. - С. 24-32.
4. Применение электромагнитного КВЧ-излучения низкой интенсивности для лечения неосложненной гастродуоденальной язвы /Л.Г.Гассанов, В.А.Зелинский, О.И.Писанко и др. // Электрон. пром-сть. - 1987. - Вып. 1. - С. 31-33.
5. Аппараты для микроволновой рефлексодиагностики и терапии "Электроника-КВЧ" / А.Н.Балаба, М.Б.Голант, Л.С.Назаренко и др. // Там же. - С. 30-31.
6. Спектрофотометрия слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта / Г.И.Кириченко, А.Е.Мосежный, В.И.Соломонов и др. // Актуальные проблемы лечения больных заболеваниями толстой кишки : Тез. докл. конф. - Железноводск, 1986. - С.28.

УДК 615.47:537.811:616.3

В.И.Соломонов,О.И.Писанко,А.Е.Мосежный,Г.И.Кириченко,В.П.Туранский

ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КВЧ ДИАПАЗОНА НА ТЕПЛОПРОДУКЦИЮ ЭПИГАСТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Характер ответных реакций в организме,возникающих при воздействии на биологически активные точки (БАТ) низкоинтенсивным (<10мВт/см^2) электромагнитным излучением (ЭМИ) КВЧ диапазона, остается еще неясным, хотя по данному вопросу существует несколько версий [1].

С целью получения дополнительной информации о механизме воздействия ЭМИ КВЧ диапазона на человеческий организм нами был применен метод тепловизионного исследования кожного покрова передней брюшной стенки при воздействии ЭМИ на БАТ, изложенный в [2].

Испытуемого укладывали на кушетку, где в течение 20 мин он проходил тепловую адаптацию. После этого производились съем и запоминание тепловизионного изображения передней брюшной стенки.Для тепловизионного контроля использовали отечественный цветной тепловизор "Радуга-МТ".

После указанных подготовительных процедур осуществляли в течение 10 мин воздействие низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ диапазона на БАТ-Е36 ("ЦЗУ-САНЬ-ЛИ"), расположенную в канале желудка. Выбор точки произведен не случайно, согласно [3], она отвечает за органы брюшной полости.

Источником низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона служил экспериментальный образец аппарата "Электроника КВЧ-01", имеющий следующие характеристики [4]: работа на фиксированной длине волны ЭМИ - 5,6 мм; уровень мощности ЭМИ на выходе излучателя - 5 мВт; режим генерации - непрерывный; вид излучателя - диэлектрическая штыревая антенна.

Исследования проводились на группе (15 человек) здоровых мужчин в возрасте 23-40 лет, изъявивших желание принять участие в эксперименте, с утра без учета индивидуального ритма состояния БАТ. Сравнение термограмм производилось как путем запоминания исходной термограммы (после тепловой адаптации в течение 20 мин) в цифровой памяти тепловизора и последующего сравнения с исследуемой,так и по фотографиям полученных термограмм.

В контрольной группе из пяти человек после тепловой адаптации (20 мин) излучатель аппарата "Электроника КВЧ" ориентировался на БАТ-Е36, имитировалась полная картина его работы, но излучение на выходе отсутствовало. На протяжении 10 мин также фиксировалась динамика телевизионного изображения, снимаемого с области передней брюшной стенки.

Результаты исследований показали, что при воздействии низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ диапазона на БАТ-Е36 ("ЦЗУ-САНЬ-ЛИ") происходят фазные температурные изменения в области эпигастрии. Так, на 2-3-й мин после начала воздействия отмечалось повышение кожной температуры на 0,4-0,6 °С ($p < 0,05$) в области эпигастрии (3-4см^2). На 5-6-й мин повышалась на 0,4-0,8 °С ($p < 0,05$) кожная температура верхней половины живота. В контрольной группе при "кожном" воздействии ЭМИ на БАТ каких-либо существенных изменений в характере тепловизионной картины не обнаружено.

Таким образом, применение низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона с целью воздействия в лечебных целях на БАТ-Е36 ("ЦЗУ-САНЬ-ЛИ") приводит к изменению теплопродукции в области эпигастрии и верхней половине живота. Это обусловлено, по-видимому, изменением трофики органов верхнего этажа брюшной полости.

Тепловизионный метод может служить одним из способов объективизации контроля механизма взаимодействия низкоинтенсивных ЭМИ КВЧ диапазона с биологическими объектами.

1. Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М.: Ин-т радиотехники и электрон.АН СССР, 1983. - 220 с.
2. Регистрация воздействия лазера на биологически активные точки тепловизором / К.К.Габелко, Г.А.Падилко, В.И.Соломонов и др.// Тепловидение в медицине: Тез. докл. (Киев, 1984). - Киев,1984.- С. 11-12.
3. Гаваа Лувсан. Традиционные и современные аспекты восточной рефлексотерапии. - М.: Наука, 1986. - 576 с.
4. Основные направления создания аппаратуры для микроволновой рефлексодиагностики и терапии / О.И.Писанко, Л.С.Назаренко, А.Н.Балаба и др. // Современные тенденции развития медицинского приборостроения : Тез. докл. Всесоюз. конф. - М., 1986. - С.27-28.

УДК 615.47.537.811:616.3

В.А.Зелинский, О.И.Писанко

НИЗКОИНТЕНСИВНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КВЧ ДИАПАЗОНА В КОМПЛЕКСНОМ КУРОРТНОМ ЛЕЧЕНИИ ЯЗВЕННОЙ БОЛЕЗНИ

По статистическим данным разных стран, язвенной болезнью желудка и двенадцатиперстной кишки страдает 1-10 % населения [1-3]. Высокая заболеваемость, частые рецидивы, длительная нетрудоспособность, поражение лиц преимущественно молодого возраста, серьезные осложнения - все это относит язвенную болезнь к самым актуальным проблемам современной гастроэнтерологии [4, 5].

При лечении язвенной болезни вне стадии выраженного обострения на первый план выступает применение различных курортных и физических факторов [6 - 8].

В последние годы появились единичные сообщения об успешном применении низкоинтенсивного (< 10 мВт/см^2) электромагнитного излучения (ЭМИ) КВЧ диапазона при лечении язвенной болезни [9-11]. Однако, на наш взгляд, эти работы имеют существенный недостаток - эффективность применения ЭМИ КВЧ диапазона не сравнивалась с эффективностью его включения в комплексную противоязвенную терапию с использованием других физических факторов, которые уже успешно применяются при лечении язвенной болезни. Следует также отметить, что в указанных работах отсутствуют сведения о влиянии ЭМИ на функциональное состояние желудка и двенадцатиперстной кишки.

Цель настоящей работы - изучение в сравнительном аспекте особенностей влияния низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона и его сочетание с грязелечением на клиническое течение язвенной болезни, функциональное состояние желудка и двенадцатиперстной кишки, процессы репарации в данных органах и на основании полученных данных разработка принципов дифференцированной курортной терапии больных язвенной болезнью. В процессе исследования изучали лечебный эффект низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона, а также его сочетания с пелоидотерапией. В качестве групп сравнения были взяты больные, получавшие терапию с применением ранее известных физических факторов: грязелечения и электропунктуры, а также их сочетаний. Все перечисленные физические факторы были включены в комплексное санаторно-курортное лечение больных язвенной болезнью, при этом всем пациентам назначали дифференцированный двигательный режим, климатотерапию, диету № 1, кислородные ванны, питье минеральной воды "Одесская".

КВЧ терапию проводили по специально разработанной методике [12]. В начале исследований определяли индивидуальную для каждого пациента терапевтическую частоту ЭМИ путем постоянного контроля электроэнцефалограммы и одновременного воздействия на биологически активную точку (БАТ) Е36 ("ЦЗУ-САНЬ-ЛИ") ЭМИ в интервале длин волн 5,6-3,8 мм. По изменению на электроэнцефалограмме бета-ритма на альфа-ритм, характеризующему переход кортиальных элементов коры головного мозга в спокойное состояние, что субъективно проявляется состоянием релаксации или сна, определяли индивидуальную терапевтическую частоту излучения.

Курс КВЧ терапии состоял из 10-15 процедур, проводимых ежедневно. Воздействие низкоинтенсивным ЭМИ осуществляли на индивидуальных для каждого больного терапевтических частотах на БАТ Е36 в течение 30 мин.

В качестве источника низкоинтенсивного ЭМИ применяли экспериментальный образец аппарата "Электроника КВЧ" [13], обеспечивающий работу на заданной фиксированной частоте КВЧ диапазона при уровне выходной мощности не более 5 мВт.

Аппликационную пелоидотерапию проводили по митигированной методике: пелоид толщиной 3 см температурой 38 °С накладывали на область эпигастрия на 20 мин через день; всего на курс лечения 6 процедур.

Процедуры электропунктуры назначали ежедневно (на курс 12) и проводили их с помощью аппарата "ЭЛАП-I" [14], время воздействия на каждую сегментарную БАТ составляло 4 мин. При сочетании электропунктуры с грязелечением после каждого нечетного сеанса электропунктуры (время воздействия сокращали до 2 мин) осуществляли аппликационную пелоидотерапию по митигированной методике [15]. При этом на курс лечения приходилось 12 процедур электропунктуры и 6 грязевых аппликаций.

Помимо тщательного опроса больных и данных объективных методов исследования были использованы такие методы диагностики, как рентгенологические и эндоскопические исследования пищевода, желудка и двенадцатиперстной кишки, методики pH-гастродуоденографии и дуоденотонографии. Указанные методы исследования были применены к больным при поступлении в санаторий и после окончания курса лечения.

Было обследовано 350 больных язвенной болезнью желудка и двенадцатиперстной кишки в возрасте 30-60 лет (из них 90 % мужчин). Язвенной болезнью двенадцатиперстной кишки страдало 93 % обследованных. Заболевание у пациентов наблюдалось в различных стадиях течения: ремиссии - 8 %, нестойкие ремиссии - 50,5 %, затихающее обострение - 41,5 %. Длительность заболевания у 2/3 обследованных составляла 6 лет и более.

Все больные язвенной болезнью в зависимости от метода комплексного санаторно-курортного лечения были подразделены на пять групп. Формирование групп проводилось методом направленно-уравнительного отбора. Первая группа больных (68 человек) получала комплексное лечение с включением пелоидотерапии (лечебный комплекс - ЛК № 1), вторая (80) - лечение с включением электропунктуры (ЛК № 2); третья (72) - терапию с включением сочетания электропунктуры и грязелечения (ЛК № 3), четвертая (71) - лечение с включением КВЧ терапии (ЛК № 4) и пятая (59 человек) - терапию с использованием сочетания КВЧ терапии и грязелечения.

При поступлении в санаторий была выявлена следующая картина. Диспепсический синдром в той или иной степени был отмечен у большинства больных. Чаще всего пациенты жаловались на изжогу и от-

рыжку (62 и 51 % соответственно), а также на тошноту (19 %), периодическая рвота была у 9 % обследованных, ухудшение аппетита – у 11 %. Болевой синдром имел место у подавляющего большинства больных и, как правило, носил типичный для язвенной болезни характер. Жалобы на боли предъявляли 89 % больных, положительный симптом Менделя был отмечен у 67 %, болезненность в точке Боаса – у 46 %. Со стороны других органов чаще всего отмечалось нарушение функции кишечника преимущественно в виде запоров (23 %), некоторое увеличение и болезненность печени (9 %), расстройство сна (7%).

При поступлении в стационар гастродуоденофиброскопическое исследование было выполнено у 184 больных, рентгенологическое исследование верхних отделов пищеварительного тракта – у 38. При этом, по рентгеноэндоскопическим данным, язвенный дефект был зафиксирован у 44 % обследованных.

Дуоденотонографическое исследование было сделано 25 больным, у большинства из них (88 %) зафиксирован гиперкинетический тип двигательной активности двенадцатиперстной кишки (до 80 %), увеличение периода работы кишки, повышение частоты и амплитуды ее сокращений.

Исследование уровня кислотообразования в желудке и ощелачивания в двенадцатиперстной кишке было проведено у 200 больных. При этом уровень pH в корпусном отделе желудка составлял 1,5–0,04, в антральном отделе нейтрализации кислого желудочного содержимого практически не наблюдали и pH повысилась незначительно – до 1,7 ± 0,06. В силу этого кислое желудочное содержимое поступало в двенадцатиперстную кишку, что обусловливало низкий уровень pH-волн: в проксимальном отделе 2,0 ± 0,11, в дистальном – 2,9 ± 0,23. Частота кислых pH-волн в проксимальном отделе была 1,3±0,13, в дистальном – 0,3±0,05 в 1 мин. Время закисления при pH < 2,5 составляло в проксимальном отделе 13±2,0 %, в дистальном – 1,7±0,34 %, а при pH<5,0 в проксимальном отделе – 9±1,2 %, в дистальном – 2,6 ± 0,50 %. О недостаточности ощелачивания в двенадцатиперстной кишке свидетельствует также то, что кислые pH-волны были обнаружены у подавляющего числа (94 %) больных в проксимальном отделе кишки и у большинства (63 %) – в дистальном отделе.

Таким образом, у большинства больных язвенной болезнью, поступивших в санаторий, был выявлен ряд проявлений заболевания.

Клинической апробации КВЧ терапии предшествовали экспериментальные исследования на лабораторных животных, в процессе выполнения которых был установлен ряд оптимальных параметров КВЧ воздействия и зафиксировано улучшение процессов репарации при отсутствии побочного влияния.

Для характеристики результатов санаторной терапии использованы следующие градации эффективности: положительные результаты (значительное улучшение и улучшение), а также незначительное улучшение.

Прежде чем перейти к результатам комплексной санаторно-курортной терапии в целом, остановимся на влиянии различных ЛК на клинические проявления язвенной болезни и патологии со стороны других органов, функциональное состояние желудка и двенадцатиперстной кишки, а также на процессы репарации в данных органах.

Т а б л и ц а 1. Сравнительная частота исчезновения клинических проявлений язвенной болезни и патологии со стороны других органов после курса терапии различными лечебными комплексами ($q \pm m_q$)

Проявления заболевания	Частота исчезновения проявлений заболевания, %				
	ЛК № 1	ЛК № 2	ЛК № 3	ЛК № 4	ЛК № 5
Боли	81±4,8	95±2,4	99±1,2	90±3,6	95±2,9
Симптом Менделя	88±3,9	100	100	89±3,7	95±2,9
Болезненность в точке Боаса	96±2,4	100	100	85±4,2	97±2,2
Изжога	87±4,1	96±2,2	100	94±2,8	93±3,4
Отрыжка	93±3,1	96±2,2	96±2,3	96±2,3	88±4,2
Тошнота	99±1,2	100	100	100	100
Рвота	99±1,2	100	100	100	100
Понижение аппетита	100	100	100	100	100
Увеличение печени	99±2,1	100	100	99±1,2	95±2,9
Нарушение стула	99±1,2	100	100	97±2,0	100
Расстройство сна	100	100	100	100	100

Рассматривая результаты табл.1, можно отметить более высокую эффективность ЛК № 2, 3 и 5, чем ЛК № 1, и ЛК № 3 по сравнению с ЛК № 4 относительно ликвидации основного проявления болевого синдрома – болей ($p < 0,05$). Изжога (достоверно $p < 0,05$) исчезала при применении ЛК № 3 чаще, чем при использовании ЛК № 1, 4, 5.

Влияние санаторно-курортного лечения с помощью различных ЛК на частоту улучшения показателей ощелачивания в проксимальном и дистальном отделах двенадцатиперстной кишки (путем усреднения данных четырех показателей, характеризующих ощелачивание) представлено в табл.2.

При анализе этих результатов выявлено, что ЛК № 2, 4, 5 (достоверно $p < 0,05$) в большей степени улучшают показатели ощелачивания в проксимальном отделе двенадцатиперстной кишки, чем ЛК № 1. В то же время все использованные ЛК с близкой частотой улучшали показатели ощелачивания дистального отдела кишки.

Следует отметить, что с применением ЛК № 1 и 3 происходило не-

Т а б л и ц а 2. Влияние курса терапии с использованием различных лечебных комплексов на частоту улучшения показателей ощелачивания в двенадцатиперстной кишке ($q \pm m_q$)

Отдел	Частота улучшения показателей ощелачивания, %				
	ЛК № 1	ЛК № 2	ЛК № 3	ЛК № 4	ЛК № 5
Проксимальный	60±8,7	84±6,8	81±6,2	84±7,1	87±5,5
Дистальный	81±10,2	80±10,3	83±7,2	76±12,3	94±6,9

Т а б л и ц а 3. Частота исчезновения проявлений язвенной болезни после курса терапии с использованием различных лечебных комплексов ($q \pm m_q$)

Проявления заболевания	Частота исчезновения проявлений заболевания, %				
	ЛК № 1	ЛК № 2	ЛК № 3	ЛК № 4	ЛК № 5
Язвенный дефект	53±13,3	82±9,6	76±9,5	84±6,6	67±14,2
Эррозивно-воспалительные изменения	50±10,0	50±12,1	48±11,2	67±8,7	42±9,5
Дуоденогастральный рефлекс	80±20,0	0	50±50,0	56±16,7	50±18,9

большое, но достоверное улучшение одного из показателей кислотообразования в желудке.

При исследовании влияния санаторно-курортного лечения на двигательную активность двенадцатиперстной кишки было выявлено, что ее нормализация или улучшение имели место у 55 % больных, продолжительность периода покоя нормализовалась или уменьшилась у 76 % обследованных (соответственно у этого же числа больных увеличилась продолжительность периода покоя), частота сокращений кишки стала реже у 72 % больных, а амплитуда сокращений – у 40 %.

Из полученных по данным эндоскопии результатов (табл. 3) следует, что ЛК № 4 (достоверно $p < 0,05$) в большей степени увеличивает частоту рубцевания гастродуоденальных язв, чем ЛК № 1, в остальных случаях различия статистически несущественны.

С учетом совокупности динамики клинических проявлений болезни, функционального состояния желудка и двенадцатиперстной кишки, процессов репарации в данных органах эффективность санаторно-курортной терапии может быть представлена следующим образом (табл. 4).

В целом положительные результаты лечения отмечены у 88% больных. Из числа изученных ЛК наиболее эффективным оказался ЛК № 5, несколько ниже была эффективность ЛК № 4, 3 и 2.

Рассматривая полученные в работе результаты, отмечаем, что у больных язвенной болезнью, прибывших на лечение в стадиях ремиссии, нестойкой ремиссии и затихающего обострения, был выявлен целый ряд

проявлений язвенной болезни. Это потребовало проведения комплексного санаторно-курортного лечения, которое оказалось эффективным при использовании всех ЛК у большинства (80 %) больных.

Т а б л и ц а 4. Эффективность санаторно-курортной терапии язвенной болезни при использовании различных лечебных комплексов ($q \pm m_q$)

Лечебный комплекс	Частота лечебного эффекта, %	
	Положительные результаты	Незначительное улучшение
№ 1	81±4,8	19±4,8
№ 2	87,5±3,7	12,5±3,7
№ 3	89±3,7	11±3,7
№ 4	90±3,6	10±3,6
№ 5	92±3,5	8±3,5

Клинико-лабораторный контроль состояния основных органов и систем организма больных не выявил побочного действия примененных методов терапии.

Выводы

1. Изученные методы аппаратной физиотерапии и грязелечения оказались эффективными в комплексном курортном лечении больных язвенной болезнью, при одинаковой направленности действия выявлены особенности влияния примененных методов терапии в зависимости от клинических вариантов, характера их влияния на функциональное состояние желудка и двенадцатиперстной кишки, процессы репарации.

2. При клинических наблюдениях выявлены эффективность КВЧ воздействия в комплексной терапии больных язвенной болезнью и отсутствие побочных проявлений.

3. Наиболее эффективными в отношении болевого и диспепсического синдромов оказались сочетание грязелечения с электропунктурой, а также электропунктура.

4. Показатели кислотообразования в желудке несколько улучшаются при использовании пелоидотерапии и ее сочетания с электропунктурой, в большей степени улучшаются показатели ощелачивания в двенадцатиперстной кишке при сочетании с грязелечением.

5. При вовлечении в патологический процесс печени и кишечника эффект терапии у больных язвенной болезнью был выше после применения электропунктуры и ее сочетания с грязелечением.

6. Процессы репарации более выражены при лечении с использованием КВЧ воздействия.

7. Низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ диапазона является эффективным методом лечения язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки в комплексном санаторно-курортном лечении.

1. Василенко В.Х., Гребенев А.Л. Болезни желудка и 12-перстной кишки. – М.: Медицина, 1981. – 344 с.
2. Радбиль О.С. Язвенная болезнь: Обзор. – М.: Медицина, 1984. – 73 с.
3. Lorant P., Kreimer E. Krankheiten des Verdanungsustems in We-

in // Wien.-Med. - 1981.- 131, N 23/24. - P. 587-588.
4. Бурчинский Г.И. Язвенная болезнь желудка и 12-перстной кишки// Практическая гастроэнтерология. - Киев, 1978. - С. 77-129.
5. Логинов А.С. Итоги развития клинической гастроэнтерологии за прошедшее пятилетие и ее перспективы // Терапевт. арх. - 1981. - 53, № 1. - С. 11-15.
6. Серебрина Л.А. Материалы к обоснованию лечебного применения пелоидов при язвенной болезни: Дис. ... д-ра мед. наук. - М., 1968. - 544 с.
7. Циммерман Я.С. Некоторые актуальные вопросы физиотерапии язвенной болезни // Актуальные вопросы физиотерапии и курортологии: Матер. обл. конф. физиотерапевтов, курортологов и врачей санаториев-профилакториев предприятий. - Пермь, 1974. - С. 41-47.
8. Skapik M., Fixa B. Einflussader Kurbehandling anf die Immenreaktivitat von Patienten mit Ulkuskrenkseit des Swolffingerdarms // Z.Physiother. - 1981. - 33, N 4. - P. 245-249.
9. Андреев Е.А. Белый М.У., Ситько С.П. Реакция организма человека на электромагнитное излучение миллиметрового диапазона// Вестн. АН СССР. - 1985. - № 1. - С. 24-32.
10. Применение волн миллиметрового диапазона для лечения хронических язв гастродуоденальной зоны / Л.З.Балакирева, М.Б.Голант, А.А.Головатюк // Электрон. пром-сть. - 1985. - № 1. - С. 9-10.
11. Применение электромагнитного КВЧ-излучения низкой интенсивности для лечения неосложненной гастродуоденальной язвы/П.Г.Гасанов, В.А.Зелинский, О.И.Писанко и др. // Там же. - 1987. - № 1. - С. 31-33.
12. А.с. 1233874 СССР, МКИ^4 А 61 N 5/00. Способ лечения больных язвенной болезнью желудка и двенадцатиперстной кишки/И.С.Черкасов, А.А.Лобенко, В.А.Зелинский и др. // Открытия. Изобретения. - 1986. - № 20. - С. 14.
13. Приборы для микроволновой диагностики в медико-биологических исследованиях и коррекции физиологических состояний организма при некоторых его патологиях / О.И.Писанко, Л.С.Назаренко, В.А.Добровинский и др. // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. - 1987. - Вып. 1. - С. 53-55.
14. Портнов Ф.Г. Электропунктурная рефлексотерапия. - Рига: Зинатне, 1980. - 218 с.
15. А.с. 810239 СССР, МКИ^3 А 61 Н 39/00. Способ лечения язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки / Л.А.Серебрина, М.А.Сивый // Открытия. Изобретения. - 1981. - № 9. - С. 23.

УДК 621.317+615.475

В.Д.Искин

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

Биологические эффекты (БЭФ) миллиметровых волн (ММВ) (КВЧ диапазонов: 37-78 ГГц), впервые обнаруженные советскими исследователями более 20 лет назад и наблюдавшиеся в дальнейшем во многих научных лабораториях как в СССР, так и за рубежом, как известно, отличаются от биологического действия ионизирующей радиации и низкочастотных электромагнитных полей рядом особенностей [1]: высокая критичность к вариации частоты воздействующего излучения; очень низкий

энергетический порог проявления биологического действия; независимость от плотности потока мощности излучения в широком диапазоне ее изменения; отсутствие прямой пространственной корреляции между биологической зоной воздействия и зоной "отклика" на это воздействие в живом организме; совпадение биотропных параметров КВЧ излучения для биологических систем различного уровня организации от микроорганизмов до человека.

Перечисленные выше и ряд других феноменологических аспектов проблемы [2] характеризуют ее сложность и необходимость комплексного научного подхода, причем развернувшаяся в последнее время дискуссия вокруг некоторых важных вопросов, например, в связи с "резонансным" характером биологического действия микроволн, и наличие полярных точек зрения относительно каждого из них лишь усугубляют и без того сложную ситуацию при планировании и постановке конкретных экспериментов.

Следует отметить, что имеющиеся практические результаты по предпосевной обработке зерна хотя и отражают тенденцию традиционного использования новых источников электромагнитной энергии в сельском хозяйстве, но далеко не исчерпывают возможности КВЧ диапазона. Более того, по технико-экономическим соображениям [3] к наиболее вероятным перспективным областям применения КВЧ излучения в сельском хозяйстве в первую очередь, по-видимому, следует отнести селекцию, генную инженерию, иммуно-, крио- и радиозащиту генbackносителей в растениеводстве, животноводстве, рыбоводстве, экспериментальной ветеринарии, что, в свою очередь, определяет соответствующие объекты исследований: жидкие, гелеобразные и мелкодисперсные порошковые биологические материалы.

В этом плане упомянутые методологические трудности в проведении экспериментальных исследований вполне обобщаются двумя положениями [2].

1. До сих пор нет четких, определенных и всесторонне обоснованных критериев наличия БЭФ ММВ в том или другом конкретном эксперименте. Этот главный результат любых подобных исследований - есть эффект или он отсутствует - всегда в значительной степени субъективен и зависит от интуиции и опыта экспериментатора, корректности постановки опытов и многих других объективно неконтролируемых факторов.

Таким образом, назрела необходимость построения достаточно строгой и общей научной физико-математической аргументации достоверного обнаружения БЭФ ММВ с учетом как биологических (естественный разброс параметров контрольной среды, неконтролируемая возможная вариация внешних условий опыта и т.д.), так и радиофизических

(неравномерность СВЧ поля, нестабильность частоты, рассогласования в СВЧ тракте и т.д.) неопределенностей.

2. Отсутствует достаточно обоснованная и унифицированная техническая элементная база проведения экспериментальных исследований, что, во-первых, создает значительные организационные трудности при проведении работ, во-вторых, исключает возможность перепроверки получаемых результатов в различных лабораториях, в-третьих, часто приводит к получению ложных БЭФ, мешает корректной постановке экспериментов и убедительной интерпретации полученных результатов.

Причем можно с уверенностью утверждать, что благополучное разрешение второго комплекса вопросов - разработка, создание и широкое внедрение инструментальных методов и технических средств, специально предназначенных для исследования биологических систем в миллиметровом диапазоне радиоволн - не только актуально само по себе, но позволит также успешно справиться и с вопросами, упомянутыми в первом из указанных обобщений, взяв за основу, например, теорию обнаружения сигналов на фоне случайных помех: из дальнейшего будет понятна уместность этой теории применительно к данной проблеме.

Высказанные выше соображения определяют основные технические задачи на данном этапе: разработка методов исследования биологических систем с характерными размерами $d \ll \lambda$ (культуры клеток, суспензии микроорганизмов, пыльца растений и т.п.), позволяющих ускорить и повысить достоверность индикации биологического действия КВЧ излучения; разработка устройств сопряжения элементов базы КВЧ диапазона с конкретными биологическими системами - устройств, удовлетворяющих как радиофизическим требованиям (низкий КСВН, равномерная структура поля, отсутствие точки "перегрева" и т.п.), так и биологическим (возможность стерилизации, простота реализации последующих биофизических методик анализа и т.п.); создание необходимой макетно-элементной базы, техническое и метрологическое обеспечение экспериментальной апробации разработанных методов и устройств в организациях медицинского, биологического и сельскохозяйственного профиля; технологическая и методическая подготовка серийного производства наиболее удачных технических решений для их широкого внедрения в сельскохозяйственную науку и производство, включая активные и пассивные КВЧ устройства.

В совокупности названные задачи характеризуют новое научное направление, кратко сформулированное в названии этой статьи, начало которому положено публикациями [4, 5]. Сюда вошли как теоретические радиофизические предложения автора, связанные с научной экспериментальной организацией исследований в частотном диапазоне 37-78 ГГц, так и некоторые конструктивные разработки.

Поясним коротко сущность предлагаемого подхода, изложенного в [4 - 6].

Существующие методы поиска БЭФ микроволнового излучения заключаются в облучении одной или нескольких порций биологической среды КВЧ излучением на фиксированной частоте и последующем анализе свойств биологической среды по сравнению с контролем с целью установления корреляции между свойствами облученной среды и параметрами КВЧ излучения (мощностью, частотой).

Недостаток такого подхода - необходимость проведения цикла экспериментальных исследований на каждой фиксированной частоте (эта необходимость продиктована известной из множества публикаций ярко выраженной частотной зависимостью БЭФ ММВ, т.е. их узкополосностью). Следствием отмеченного недостатка являются чрезвычайная длительность, трудоемкость, рутинность поиска биологически активных радиочастот.

В отличие от изложенного традиционного подхода в основу предлагаемой методики исследований положено следующее техническое решение: биологическую среду облучают одновременно на нескольких частотах (или даже в полосе частот), а биологически активную частоту определяют по характеру пространственного (в системе координат, жестко связанной с исследуемой средой) распределения БЭФ в среде по априорно известному, заложенному при облучении алгоритму.

Сформулированный подход в случае его успешной реализации, несомненно, позволит существенно снизить временные затраты и трудоемкость экспериментального поиска биологически активных радиочастот, повысить достоверность получаемых результатов. Что же касается упомянутой практической реализации, то имеющиеся некоторые экспериментальные пробы дают основания для оптимизма.

Различные модификации этого метода и примеры его осуществления, учитывающие конкретные условия проведения экспериментов, свойства различных биологических систем и другие параметры, а также технические решения, расширяющие область применения предложенного метода, охвачены группой работ [4-19].

Необходимо подчеркнуть, что создание охарактеризованных выше методов и устройств с заданными параметрами требует исчерпывающего знания диэлектрических свойств исследуемых биологических систем, что, в свою очередь, потребовало разработки соответствующих измерительных средств. Здесь за методическую основу измерения ком-

плексной диэлектрической проницаемости биологических систем (а также небиологических - модельных жидких и порошковых веществ) была взята дифференциальная методика измерений, впервые предложенная В.А.Кашпуром и В.Я.Малеевым (1971 г.) и заключающаяся в просвечивании последовательно расположенных образцового и исследуемого объектов при вариации их геометрических размеров и постоянной суммарной толщине, т.е. при неизменном согласовании.

Этот подход был развит [20-23] и практически реализован в группе публикаций, отраженных в резюмирующей работе [24]. Сейчас осуществляются техническая проработка и экспериментальная апробация новых технических решений, изложенных в [25, 26].

В настоящее время на кафедре физики ХИМЭСХ имеются реализованные конструкторские разработки и аппаратурные стенды, направленные на решение ряда экспериментальных задач (рис.1-4, см. вклейку).

Установка для измерения комплексной диэлектрической проницаемости разбавленных водных растворов (рис.1), внедренная в 1982г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте животноводства Лесостепи и Полесья УССР для исследования свойств растворов куриного желтка [24], является прототипом создаваемых сейчас новых средств для дифференциальных измерений комплексной диэлектрической проницаемости различных веществ и материалов.

На рис.2 изображены кюветы, конструкция и принцип работы которых позволяет реализовать целый ряд предложенных новых технических решений как в области диэлектрических измерений [25], так и для исследований биологического действия КВЧ излучения на жидкие и порошкообразные системы [7, 11, 19]. Простота и отработанная технологичность изготовления этих кювет, их многофункциональность и широкополосность позволяют уже сейчас ориентироваться на их широкое тиражирование и использование в практике биологических и сельскохозяйственных исследований.

Устройства, изображенные на рис.3, как и предыдущие, представляются наиболее удачным решением задачи микроволновой обработки жидких биологических систем и монослоя культуры клеток. Несмотря на внешнюю простоту, эти устройства, реализующие ряд методических новинок [11, 25] и характеризующиеся хорошими радиофизическими характеристиками (КСВН<2) во всей частотной полосе КВЧ диапазона, содержат в себе несколько технических особенностей, обеспечивающих герметизацию биологической среды и волноводного тракта с возможностью стерилизации кюветы нагреванием при температурах вплоть до 120-130 °С. Подобные устройства представляются первым шагом на пути повышения производительности микроволновой обработки биологи-

ческой среды и доведения ее до технологически значимых в микробиологической промышленности объемов.

Установка, изображенная на рис.4, предназначена для исследования воздействия КВЧ излучения на биологические липидные мембраны (БЛМ) и создана с помощью сотрудников Института проблем криобиологии и криомедицины АН УССР в плане технической реализации устройства [16].

Общая характеристика полученных экспериментальных результатов в основном сводится к следующему: экспериментальная апробация разработанных средств измерения комплексной диэлектрической проницаемости влагонасыщенных систем подтверждает, что измерение действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости с точностью 0,3 % является вполне разрешимой задачей; экспериментальные результаты по воздействию КВЧ излучения на биологические системы в организациях биологического и сельскохозяйственного профиля в настоящее время могут быть сформулированы так: а) наличие вполне определенных БЭФ при воздействии СВЧ поля не вызывает сомнений у экспериментаторов; б) сущность зарегистрированных БЭФ позволяет уже сейчас ставить вопрос о широком внедрении разрабатываемых устройств в соответствующих отраслях.

Сказанное позволяет рассчитывать на то, что дальнейшие работы в названном научном направлении приведут к подтверждению некоторых известных и достоверному обнаружению новых БЭФ ММВ, а следовательно, к цели этих исследований: широкому внедрению в практику сельскохозяйственного производстава методов и устройств КВЧ диапазона, реализующих обнаруженные БЭФ на уровне новых высокоэффективных технологий.

Автор выражает признательность всем своим соавторам по докладу, сделанному на сессии Научного совета АН УССР по проблеме "Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых электромагнитных волн", материалы которого легли в основу этой статьи.

1. Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты /Под ред. Н.Д.Девяткова.-М.,1983.-220 с.
2. Биологические эффекты миллиметровых волн: Обзор /В.Д.Искин, Ю.В.Завгородний, Н.М.Яценко и др. // Рук.деп. в ВИНИТИ. - 1987. - № 7591-В87. - С. 75.
3. Искин В.Д., Яценко Н.М. Биологические эффекты микроволнового излучения // Механиз. и электрифик. с.х. - 1987. - № 12.-С.39.
4. Искин В.Д. Радиофизические аспекты методологии поиска резонансных биологически активных частот в миллиметровом диапазоне радиоволн // Биофизика. - 1985. - 30, вып. 3. - С. 492.
5. Искин В.Д. Радиофизические методы поиска биологических эффектов микроволнового излучения // Рук. деп. в ВИНИТИ. - 1987. - № 7592-В87. - С. 49.
6. А.с. 1209239 СССР, МКИ[4] А 61 N 5/02. Способ определения частот для воздействия на биологические ткани / В.Д.Искин, Л.П.Демина,

П.А.Клейман и др.//Открытия.Изобретения.-1988.-№ 5.-С. 36.
7. А.с. 1234762 СССР, МКИ⁴ G 01 N 23/00. Способ определения биологически активных радиочастот / В.Д.Искин, М.Л.Гольдин, Л.Ф.Кучин, А.В.Медведовский // Там же. - № 20. - С. 196.
8. А.с. 1325342 СССР, МКИ⁴ G 01 N 27/02. Способ контроля свойств биологической среды / В.Д.Искин // Там же. - 1989. - № 27. - С. 161.
9. А.с. 1167483, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для поиска биологически активных радиочастот / В.Д.Искин, Л.Г.Айзенберг, С.Д.Богаенко, Г.В.Арзамасцев // Там же. - 1985. - № 26.-С.172.
10. А.с. 1295906 СССР, МКИ⁴ G 01 N 33/48. Способ поиска биологически активных радиочастот / В.Д.Искин // Там же. - 1987. - № 17. - С. 272.
11. А.с. 1170334 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для исследования микроорганизмов с использованием микроволн / В.Д.Искин, Г.В.Арзамасцев, Л.Ф.Кучин, В.А.Грабина // Там же. - 1985. - № 28. - С. 165.
12. А.с. 1309729 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для поиска биологически активных радиочастот / В.Д.Искин // Там же. - 1988. - № 11. - С. 285.
13. А.с. 1366925 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Способ поиска биологически активных радиочастот / В.Д.Искин // Там же. - 1988. - № 2. - С. 181.
14. А.с. 1357809 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для поиска биологически активных радиочастот / В.Д.Искин, А.Г.Лазаренко// Там же. - 1987. - № 45. - С. 162.
15. А.с. 1366926 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для поиска биологически активных радиочастот / В.Д.Искин // Там же. - 1988. - № 2. - С. 182.
16. А.с. 1341559 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для исследования свойств биологической среды / В.Д.Искин, С.В.Руденко // Там же. - 1987. - № 36. - С.202.
17. Искин В.Д. Метод ускоренного поиска частотно-зависимых биологических эффектов миллиметровых волн: Тез. докл. // VI Всесоюз. семинар "Применение мм излучения низкой интенсивности в биологии и медицине". - Звенигород, 1986. - С. 98-99.
18. Искин В.Д., Райс Б.Г., Медведовский А.В. Кюветы для микроволновой обработки биологических систем // Там же. - С. 100-101.
19. Искин В.Д., Медведовский А.В. Разработка и экспериментальная апробация кювет для микроволновой обработки биологических систем // Рук. деп. в ВИНИТИ. - 1987. - № 2616-В87. - С. 19.
20. А.с. 853501 СССР, МКИ³ G 01 N 22/00. Устройство для определения диэлектрической проницаемости растворов / В.Д.Искин, Л.Ф.Кучин, А.С.Черепнев // Открытия. Изобретения. - 1981. - № 29. - С. 210.
21. А.с. 970199 СССР, МКИ³ G 01 N 22/00. Автоматический анализатор жидкости /В.Д.Искин // Там же. - 1982. - № 40. - С. 175.
22. Искин В.Д., Кучин Л.Ф. Амплитудно-фазовый контроль жидкостей в миллиметровом диапазоне радиоволн // Приборы и системы управления. - 1983. - № 5. - С. 22-23.
23. Искин В.Д., Кучин Л.Ф. Радиоволновый контроль веществ методом дифференциальной модуляции зондирующего излучения // Электрон. обработка материалов. - 1983. - № 3. - С. 73-75.
24. Искин В.Д. Исследование свойств жидких растворов в миллиметровом диапазоне радиоволн и разработка устройств контроля их малых изменений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Минск, 1983. - 18 с.
25. А.с. 1305609 СССР, МКИ⁴ G 01 R 27/26. Устройство для измерения параметров диэлектриков / В.Д.Искин // Открытия. Изобретения.- 1987. - № 15. - С. 184.
26. А.с. 1196742 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/04. Влагомер. /Л.Г.Айзенберг, В.Д.Искин // Там же. - 1985. - № 45. - С. 168.

УДК 621.317+615.475

В.Д.Искин, Г.Т.Буткус, А.В.Бутенко, А.В.Медведовский

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ В ВОДЕ

Введение. Одним из перспективных приложений техники миллиметровых волн (КВЧ диапазон: 37-78 ГГц) является использование излучения этого частотного диапазона в научных и практических задачах биологии, медицины и сельского хозяйства [1, 2].

В настоящее время основные трудности в постановке корректных научных экспериментов, связанных с изучением биологического действия КВЧ излучения, сводятся к недостаточно развитой для указанных целей элементной базе КВЧ техники. Особые проблемы возникают при сопряжении конкретных биологических объектов, в том числе жидких биологических систем (БС), с источниками излучения: трудности согласования, устранение точек "перегрева", обеспечение изучения свойств биологической среды непосредственно в процессе микроволновой обработки и т.д., причем наиболее распространенный экспериментальный подход, заключающийся в использовании рупорных излучателей различных конструкций, расположенных над или под плоским слоем облучаемой БС, содержит весь набор упомянутых недостатков [3]. Это приводит к многочисленным артефактам и существенно усложняет интерпретацию получаемых результатов.

Настоящая статья посвящена экспериментальному изучению КВЧ излучателей, предложенных в ряде недавних публикаций [4-7] и имеющих, по мнению авторов, значительные преимущества перед существующими.

1. Постановка и краткая характеристика задачи. В последнее время обозначился новый подход к экспериментальному изучению биологического действия радиоволн КВЧ диапазона [4-9]. Этот подход заключается в установлении пространственной корреляции (в системе координат, жестко связанной с исследуемой БС) между амплитудой поля падающей на БС электромагнитной волны и свойствами биологической среды. Для практической реализации такого метода исследований в качестве одного из вариантов КВЧ излучателя предложен радиопрозрачный стержень, полностью погруженный в биологическую среду, а соотношение между диэлектрической проницаемостью стержня $\varepsilon_{ст}$ и среды $\varepsilon_{ср}$ описывается неравенством $\varepsilon_{ст} \ll |\varepsilon_{ср}|$ [7]. Здесь необходимо подчеркнуть, что приведенное неравенство не только по определению нехарактерно для широко распространенных диэлектрических волноводов, но и по существу содержит в себе мало изученный в

теоретической и прикладной электродинамике случай распространения электромагнитной волны в СВЧ тракте с граничными условиями, учитывающими комплексность диэлектрической проницаемости окружающей среды.

В то же время именно прямоугольные диэлектрические стержни (ДС) представляют первоочередной практический интерес в конкретных задачах микроволновой радиобиологии в тех случаях, когда требуются плоскопараллельные и оптически прозрачные грани для микроскопических исследований БС, расположенных вблизи поверхностей стержня, непосредственно в процессе облучения. Например, в [5] в такой системе предложено использовать режим стоячей волны для поиска участков БС, характеризующихся экстремальными изменениями ее биофизических свойств, с целью последующего определения оптимальной биологически активной частоты КВЧ излучения; в [9] описывается методика исследований БС, основанная на экспоненциальном затухании КВЧ поля вдоль оси стержня на его поверхности.

В связи с этим возникает ряд вопросов, касающихся возможности реализации с помощью описанного излучателя предложенных методик исследований, а именно: каков характер затухания мощности КВЧ волны в биологической среде, расположенной на или вблизи поверхности стержня вдоль его оси, и существуют ли пути варьирования этого затухания; возможно ли создание в БС периодической в пространстве и неизменной во времени амплитуды КВЧ поля с нулевыми значениями в узлах и равными расстояниями между ними (ведь глубина проникновения КВЧ поля в БС на порядок меньше его длины волны); какова модовая структура КВЧ поля в стержне; каким образом можно обеспечить энергетически равномерное облучение БС.

Далее при рассмотрении этих вопросов для определенности вместо реальной биологической среды (суспензии микроорганизмов, культуры клеток в физрастворе и т.п.) в качестве модельного объекта используется водопроводная вода, электрофизические свойства которой близки к свойствам названных БС.

2. Некоторые теоретические оценки. Строгое теоретическое рассмотрение особенностей распространения КВЧ волны в диэлектрическом стержне, окруженном водой ($\varepsilon = 20+29,8i$ на частоте 37,5 ГГц [10]) сопряжено со значительными трудностями. Более того, если для аксиально-симметричных волноводных систем (стержень круглого сечения) решение охарактеризованной задачи возможно хотя бы численными методами исходя из известного общего решения уравнений Максвелла в цилиндрических функциях [11], то для стержней прямоугольного сечения возникающие аналитические трудности связаны с невозможностью разделения переменных в получаемых дифференциальных

уравнениях и с некорректностью использования приближенных граничных условий Леонтовича – Щукина на границе диэлектрик – вода.

Тем не менее можно провести некоторые численные оценки для волны H_{10}, опираясь на ее представление в виде двух плоских волн, распространяющихся под углом друг к другу [12].

Как известно [12], потери (погонное затухание α (мм$^{-1}$) вдоль оси волновода) в металлических стенках волновода могут быть рассчитаны из выражения

$$\alpha^M = \frac{1}{2}\,\frac{R_s \oint_L H_{tg}^2\,dl}{R_e \int_S [\vec{E}\times\vec{H}^*]\,\vec{i}_z\,ds}\,, \qquad (1)$$

где R_s – активная составляющая поверхностного сопротивления на единицу длины проводника; $\vec{i}_z$ – вектор, коллинеарный оси волновода; H_{tg} – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля; L и s – параметр и площадь поперечного сечения волновода соответственно.

Из (1) следует, что в величину α дают вклад потери мощности в широких α_x и узких α_y стенках волновода: $\alpha = \alpha_x + \alpha_y$. Для медных волноводов $\alpha^M \simeq 10^{-5}$ мм$^{-1}$, причем раздельное интегрирование числителя (1) по x и по y позволяет рассчитать

$$\xi = \frac{\alpha_x^M}{\alpha_y^M} > 1\,. \qquad (2)$$

Тогда для системы стержень – вода (С – В) согласно [4] $\alpha_y^в$ может быть рассчитано классическими методами исходя из упомянутого разложения волны H_{10} на плоские волны, а $\alpha_x^в$ затем можно найти, используя значение $\xi = 3$ для металлических волноводов, полученное из (1). Однако в этом случае $\alpha^в$ оказывается значительно больше ($\sim 0,1$ мм$^{-1}$), чем рассчитанное непосредственно по формуле (1) [4]. Это расхождение свидетельствует о существенном нарушении в случае С – В тех физических предположений и математических приближений, в рамках которых выведено выражение (1), что, в свою очередь, вообще ставит под сомнение справедливость в данном случае неравенства (2). Описанные теоретические трудности, как следствие, содержат один из принципиальных вопросов, на которые может дать ответ только эксперимент: справедливо ли высказанное в [4] предположение о распространении в системе С – В волны, близкой по своей структуре к волне типа H_{10} прямоугольного металлического волновода.

Далее, если проведенные в [4] оценки по порядку полученных величин близки к истинным, то рассчитанное значение $\alpha^в$ приводит к цепочке неравенств

$$\alpha^{м} \ll \alpha^{в} \ll \alpha_0^{в} , \qquad (3)$$

где $\alpha_0^{в} = 2,185$ мм$^{-1}$ [4] характеризует погонное затухание в воде как таковой по закону

$$p' = p_0' e^{-2\alpha_0^{в} x} . \qquad (4)$$

Аналогичная зависимость имеет место и вдоль оси z стержня

$$P_z = P_{0z} e^{-2\alpha^{в} z} , \qquad (5)$$

а потери мощности на единицу длины стержня или, что то же самое, плотность потока мощности p на облучаемой БС находятся из (5)

$$p = -\frac{1}{L}\frac{\partial P_z}{\partial z} = \frac{2\alpha^{в} P_{0z}}{L} e^{-2\alpha^{в} z} . \qquad (6)$$

Из (6) следует, что для примерно равноэнергетического облучения БС вдоль оси стержня в режиме бегущей волны (5) необходимо выполнение условия

$$\alpha^{в} z \ll 1 . \qquad (7)$$

При создании в стержне режима короткого замыкания путем, например, металлизации его торца для результирующей волны в стержне имеем

$$P_z = 2P_{0z} e^{-2\alpha^{в} z} \sin kz , \qquad (8)$$

и выполнение (7), как видно из (8), позволяет реализовать в стержне режим, близкий к режиму стоячей волны. В этом случае, как видно из сравнения (5) и (6), которые имеют одинаковую функциональную зависимость, в приповерхностных слоях стержня можно ожидать существования также периодической вдоль оси z структуры поля, повторяющей (с точностью до постоянного множителя) зависимость (8). Таким образом, выполнение (7) позволяет вплотную подойти к практическому осуществлению предложенных в [4-6, 8] методов исследования БС.

Однако приведенные ранее численные оценки $\alpha^{в}$ даже при справедливости неравенств (3), которые, как уже говорилось, сами нуждаются в экспериментальном подтверждении, не дают оснований для выполнения (7) на величинах z, достаточных для наблюдения нескольких (хотя бы двух) экстремумов стоячей волны с нулевыми значениями мощности в узлах.

Значительное уменьшение $\alpha^{в}$ с целью выполнения (7) на больших длинах стержня z можно попробовать достигнуть покрытием поверхности стержня тонким слоем металла с соблюдением условия

$$d \ll \delta_0 , \qquad (9)$$

где d – толщина слоя покрытия, в δ_0 – величина скин-слоя ($\sim 0,3$ мкм) материала покрытия на используемых частотах. Если такой прием приведет к справедливости (7), то (8) преобразуется к виду

$$P(z) \simeq P_0 \sin kz , \qquad (10)$$

и на поверхности стержня зависимость $P(z)$ должна иметь аналогичный синусоидальный вид.

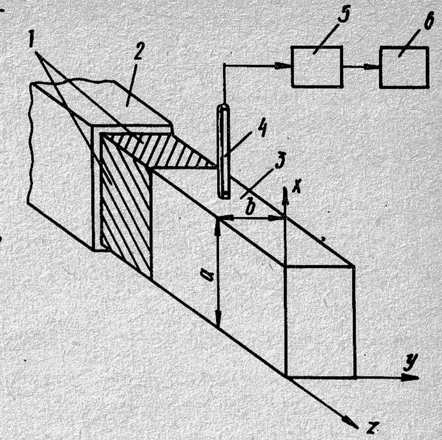


Рис.1. Схема измерений: 5 – предусилитель с источником напряжения смещения; 6 – селективный нановольтметр

3. Описание экспериментальной установки и методики измерений.

Схема измерения структуры поля КВЧ излучения диэлектрических стержней в воде показана на рис.1.

Исследуемые образцы излучателей состояли из отрезков прямоугольных медных волноводов 2 стандартных сечений ($a \times b$), каждый из которых заканчивался отрезком диэлектрического стержня 3 – плавленого кварца марки КВ ($\varepsilon' = 3,8$; $tg\delta \simeq 10^{-4}$) с зеркально полированными поверхностями. Герметичность соединения волновода 2 со стержнем 3 обеспечивалась водостойким радиопрозрачным клеем К-400. Участки поверхностей стержня в месте соединения с волноводом предварительно металлизировались путем термического впекания азотнокислого серебра 1 с толщиной покрытия не менее 5 мкм. Медные покрытия с толщиной слоя 50–200 Å, (т.е. меньше скин-слоя меди в используемом диапазоне частот; далее: СП – скин-покрытие) наносились путем вакуумного напыления.

Длина стержней выбиралась большей, чем рассчитанная из предположения $\alpha^{в} \simeq 0,1$ мм$^{-1}$ (см. п.2) для затухания 60 дБ, и равнялась 60 мм. Ближний к генератору конец стержня для улучшения согласования имел форму пирамиды высотой ~ 15 мм. Каждый образец был снабжен емкостью, заполнение которой водой обеспечивало полное погружение ДС в воду. В описанных условиях коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) СВЧ тракта, измеренный с помощью панорамного измерителя КСВН и ослаблений Р2-65/68/69, с подключенным

ДС не превышал 1,7 (после заполнения емкости) в полосе частот 37–78 ГГц.

Для измерения распределения поля применялся миниатюрный зонд 4, подробно описанный в [13]. Его основные характеристики, существенные для данного эксперимента, следующие: размеры – 0,3х0,8 х х 30 мм, пространственное разрешение – не хуже 0,3 мм, чувствительность в диапазоне 37–78 ГГц – не хуже 2 мВ/мВт·см$^{-2}$ в пересчете на плотность потока мощности плоской волны.

Выходной сигнал зонда P пропорционален квадрату амплитуды электрического поля $|E^2|$. В эксперименте измерялись относительные величины, поэтому зонд не калибровался. Точность измерения составляла ± 10 %.

Перемещение зонда в пространстве относительно стержня производилось с помощью трехкоординатного механизма. В связи с конечными габаритами зонда, а также из-за трудностей визуальной юстировки исходное положение зонда устанавливалось с точностью 0,2мм. Погрешность относительных измерений x, y, z при перемещениях зонда не превышала 0,05 мм.

Во всех последующих экспериментах, где это особо не оговорено, чувствительный элемент зонда 4 (антенна с детектором – диодом Шоттки) находился на высоте не менее 0,3 мм над узкой стенкой стержня или на расстоянии не менее 0,5 мм от широкой его стенки, что связано с геометрией зонда.

4. Анализ результатов. На рис. 2, 3 показаны зависимости $P(z)$, снятые вблизи широких и узких стенок стержней без покрытий (рис.2) и с покрытиями (рис. 3). Штрихом изображены соответствующие зависимости от координаты z погонного затухания α (для упрощения все обозначения α_x^b, α_y^b, α_z^b без утраты своего смыслового значения, которое следует из описания $P(z)$, заменены символом α).

Из рис.2 следует, что в пределах погрешностей измерений (~ 10 %) погонное затухание α_y^b вдоль узких стенок меньше затухания α_x^b вдоль широких стенок стержней. Значит, соотношение (2), полученное из (1) в предположении больших значений проводимости стенок волновода, справедливо и для рассматриваемого случая С – В.

Немонотонности в кривых на рис. 2, 3, особенно на начальных участках при небольших z, объясняются, по-видимому, наличием резкой границы металл – вода в материале стенок стержней и возбуждением на этой неоднородности вторичных волн. Эти волны, как видно из графиков, влияют на структуру поля не только вблизи границы

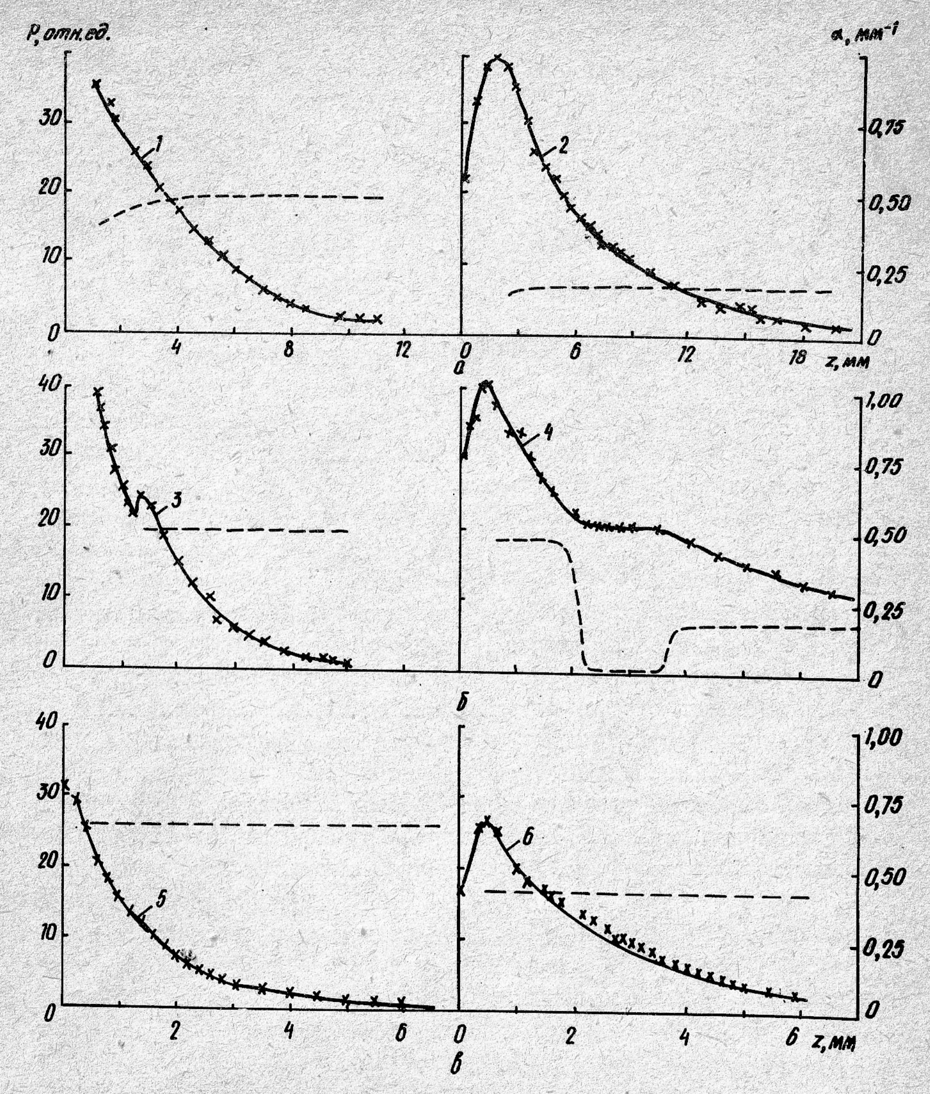


Рис.2. Зависимости $P(z)$ и $\alpha(z)$ (штриховые линии) вблизи широких (кривые 1, 3, 5) и узких (кривые 2, 4, 6) стенок стержней без проводящих покрытий: а – $a \times b$ = 7,2 х 3,4 мм², f = 38 ГГц; б – $a \times b$ = 5,2 х 2,6 мм², f = 53,55 ГГц; в – $a \times b$ = 3,6 х 1,8 мм², f = 53,55 ГГц

металл – вода, формируя характерный экстремум мощности, но, распространяясь вдоль оси z по радиопрозрачному стержню, фазируются с основной волной и тем самым нарушают экспоненциальный харак-

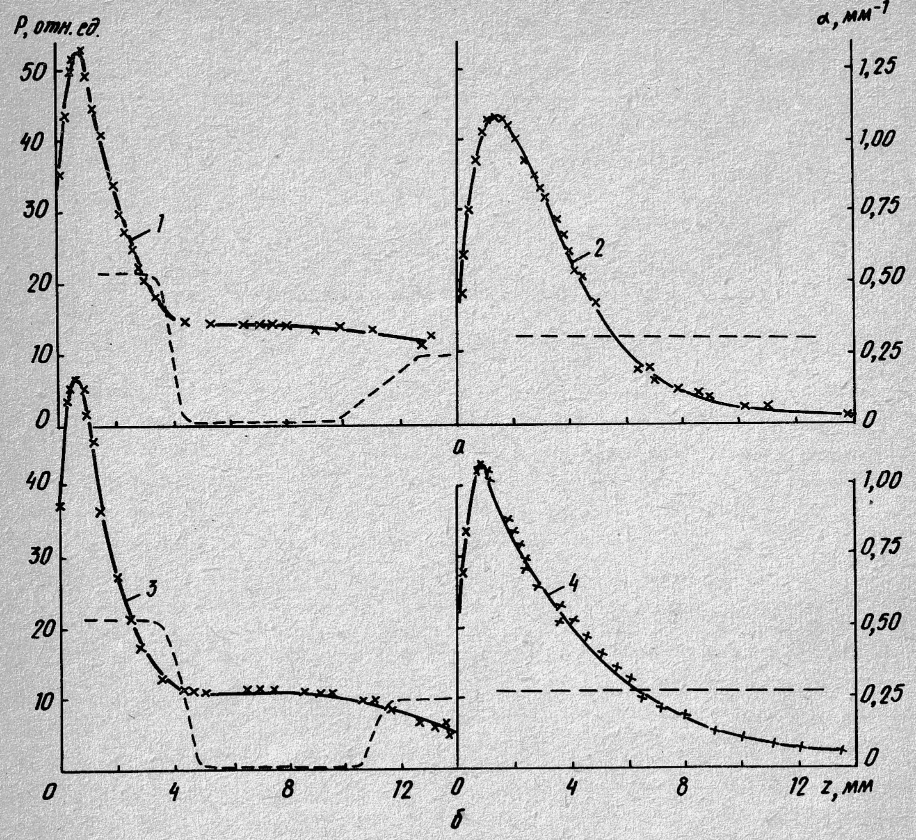


Рис.3. Зависимости $P(z)$ и $\alpha(z)$ (штриховые линии) на частоте 53,55 ГГц вблизи широких (кривые 1, 3) и узких (кривые 2,4) стенок стержней сечением 5,2 x 2,6 мм^2 с проводящими СП: а – покрытие нанесено только на узкие стенки; б – покрытие нанесено на все четыре стенки стержня

тер продольного затухания на расстояниях, значительно превышающих глубину проникновения поля в воду.

Как следует из графиков, несмотря на отмеченные отклонения продольного затухания СВЧ поля от экспоненциального закона, коэффициенты затухания вблизи широкой стенки для стержней с СП меньше аналогичных коэффициентов для стержней без покрытий, а последние, в свою очередь, гораздо меньше упомянутого в п.2 погонного затухания $\alpha_0^в$, характеризующего диссипативные свойства воды как таковой.

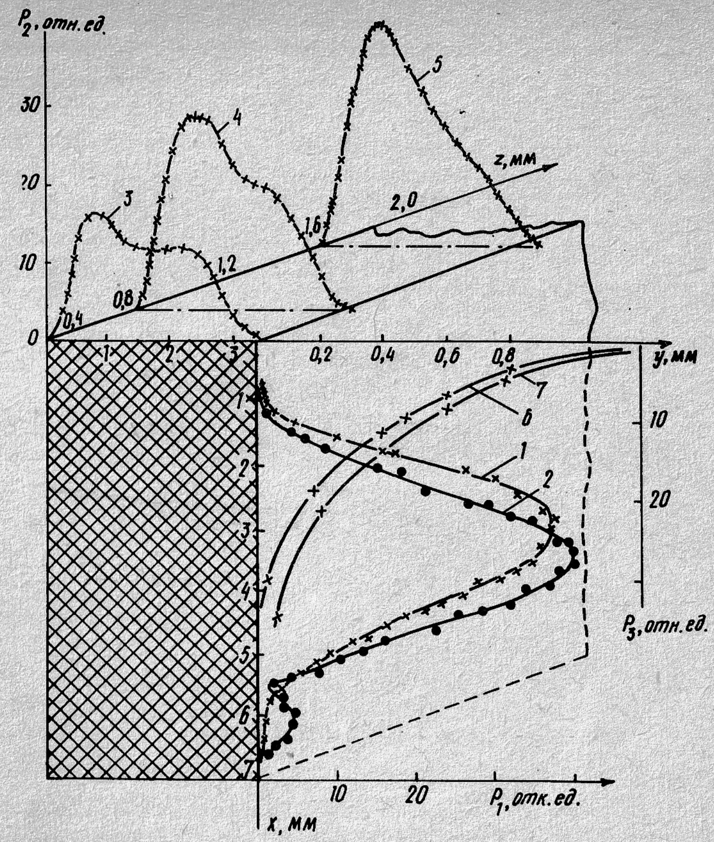


Рис.4. Зависимости мощности от координат x, y, z при перемещении зонда поперек широкой стенки (кривые 1, 2 в координатах $P_1(x)$), поперек узкой стенки (кривые 3-5 в координатах $P_2(y, z)$) и при удалении зонда перпендикулярно широкой стенке в направлении y (кривые 6, 7 в координатах $P_3(y)$)

Таким образом, описанные эксперименты подтверждают справедливость теоретических оценок (3).

На рис.4 представлены зависимости $P(x, y, z)$ в системах координат, связанных с ДС, причем заштрихованное поперечное сечение стержня расположено в плоскости xy.

Кривые 1, 2 отвечают на важный вопрос о модовой структуре поля в исследуемых системах. Вид этих зависимостей $P_1(x)$, снятых на частоте 53,55 ГГц поперек широкой стенки стержней различных сечений (кривая 1 для стержня 7,2 x 3,4 мм^2, кривая 2 для стержня

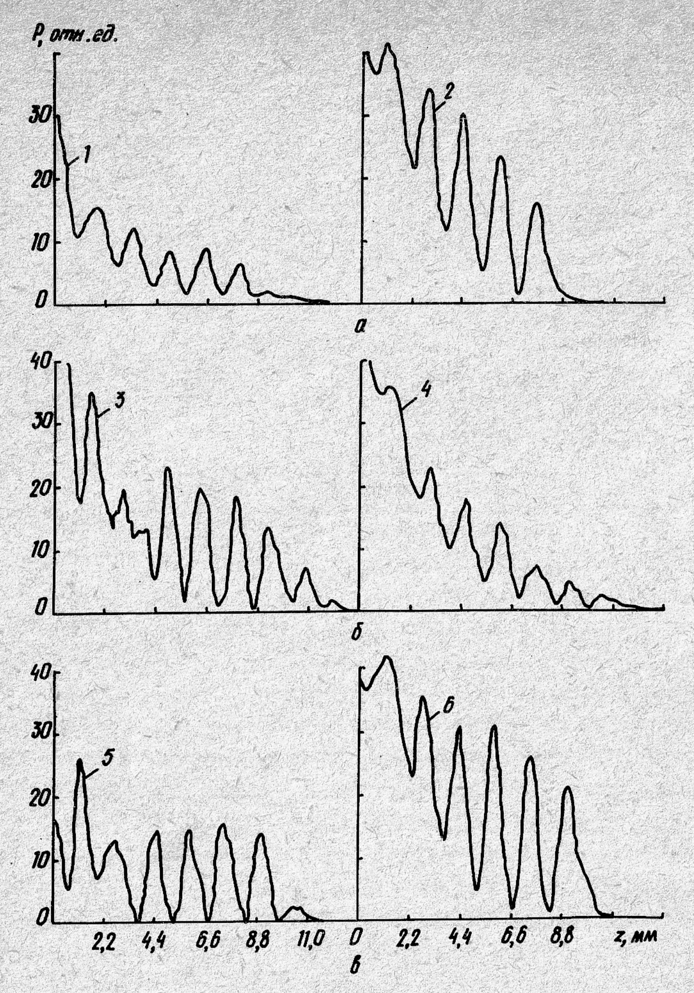


Рис.5. Зависимости $P(z)$ на частоте 53,55 ГГц вблизи широкой (кривая 1, 2) и узкой (кривые 2,4) стенок стержней длиной l и сечением 5,2x2,6 мм² с короткозамыкающим металлическим торцом: а – l = 9 мм, без покрытия; б – l = 11,5 мм, СП на узких стенках; в – l = 9 мм, СП на узких стенках

5,2 x 2,6 мм²), убедительно доказывает, что в обоих случаях в стержнях распространяется волна, близкая по своей структуре к волне основной моды H_{10} металлического одномодового волновода.

Наличие поля $P_2(y, z)$ вблизи узкой стенки стержня (кривые 3–5 на рис.4 сняты на частоте 53,55 ГГц для стержня сечением 7,2x x 3,4 мм²) обусловлено отличной от нуля тангенциальной составляю-

щей электрического поля на поверхности воды. При этом увеличение амплитуды поля в положительном направлении оси z коррелирует с характером изменения $P(z)$ (кривая 2 на рис. 2,а).

Кривые 6,7 на рис.4, снятые путем удаления зонда в направлении, перпендикулярном широкой стенке стержня, характеризуют зависимость $P_3(y)$ СВЧ мощности в воде и служат дополнительным подтверждением справедливости (3). Отсутствие в данном случае упомянутых ранее интерференционных эффектов обусловило строго экспоненциальный спад мощности. Эти эксперименты позволили рассчитать коэффициент $\alpha_0^в = 2,7 \pm 0,05$ мм$^{-1}$ для воды на частоте 53,55 ГГц, который, как и следовало ожидать, не зависит от покрытия стержней (кривые 6, 7 сняты для СП и БП стержней сечением 5,2x2,6 мм² соответственно) и является функцией только частоты и электрофизических свойств воды.

Результаты описанных экспериментов были затем использованы для ответа на основной вопрос, связанный с возможностью создания на поверхности воды строго периодической структуры поля.

Для этого были использованы ранее исследованные стержни, зависимости $P(z)$ для которых изображены на рис. 2,б и 3,а. Стержни укорачивались до длины, позволяющей возбудить в них отраженную от дальнего торца (закрытого металлической пластинкой) волну, близкую по амплитуде к падающей, и тем самым создать режим стоячей волны.

На первом этапе длины стержней выбирались такими, чтобы обеспечить равный КСВН, т.е. добиться примерно одинакового характера увеличения размаха и уменьшения абсолютного значения амплитуды синусоидальной составляющей на фоне продольного затухания СВЧ поля в соответствии с (8). Соответствующие экспериментальные зависимости изображены на рис. 5,а и 5,б.

После повторного укорочения СП стержня до длины l = 9 мм, которая, как следует из рис. 3,а (кривая 1), соответствует окончанию участка $\alpha(z) = 0$, зависимость $P(z)$ уже имеет ярко выраженную периодичность с несколькими близкими по величине экстремумами и, что особенно важно, нулевыми ординатами минимумов (рис. 5,в, кривая 5). Легко видеть, что этот график идентичен структуре поля стоячей волны (10) на длине стержня более 5 мм.

Сравнение рис. 5,а и 5,б, реализующих функциональную зависимость (8), и рис. 5,в, осцилляции на котором вдоль широкой стенки близки к выражению (10), доказывает существенное влияние СП на продольный коэффициент затухания $\alpha_x^в$ и возможность использования таких покрытий для формирования требуемой структуры поля на поверхности биологической среды.

Заключение. Экспериментальные результаты подтвердили высказанное в [4, 8] предположение о том, что КВЧ поле в ДС прямоугольного сечения, погруженном в воду, по своей структуре близко к полю волны H_{10} в металлическом волноводе того же поперечного сечения и отличается от последнего лишь большими потерями в "стенках".

Результатом исследований явилось сопоставление коэффициентов затухания вблизи широких α_x и узких α_y стенок ДС, а также отмеченное влияние на α_x и α_y проводящего СП, толщина которого меньше толщины спин-слоя в материале покрытия в используемом частотном диапазоне. Отмечена возможность уменьшения погонного затухания $\alpha = \alpha_x + \alpha_y$ с помощью СП, что приводит к усилению неравенства $\alpha \ll \alpha_0^{в}$ и может быть использовано в устройствах [7] радиоволнового высокочувствительного контроля состава и свойств веществ и материалов.

Обнаруженные нелинейности зависимости $\alpha(z)$ связаны, по-видимому, с возбуждением вторичных волн на границе металл - вода, причем можно сделать предварительный вывод о влиянии СП на величину и характер этой нелинейности, которую легко использовать для реализации равноэнергетического (по плотности потока КВЧ мощности как функции от z) облучения влагонасыщенных биологических систем с помощью предложенной антенны.

С помощью СП экспериментально получено на поверхности сильнопоглощающей модельной среды (воды) строго периодическое в пространстве и неизменное во времени распределение амплитуды КВЧ поля с нулевыми значениями в узлах и несколькими эквидистантно расположенными экстремальными значениями КВЧ поля, что указывает на возможность практической реализации новых методов [4-9] исследования биологических систем в КВЧ диапазоне радиоволн.

1. Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М.: Ин-т радиотехники и электрон. АН СССР, 1985. - 284 с.
2. Биологические эффекты миллиметровых волн: Обзор / В.И.Искин, Ю.В.Завгородний, Н.М.Яценко и др. // Рук. деп. в ВИНИТИ. - 1987. - № 7591-В87. - С. 75.
3. Ряковская М.Л., Штемлер В.М. Поглощение энергии электромагнитных волн миллиметрового диапазона в биологических препаратах плоскослоевой структуры // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под ред. Н.Д.Девяткова. - М., 1983. - С. 172-181.
4. Искин В.Д. Радиофизические аспекты поиска резонансных биологически активных частот в миллиметровом диапазоне радиоволн // Биофизика. - 1985. - 30, вып. 3. - С. 492.
5. А.с. 1170334 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для исследования микроорганизмов с использованием микроволн / В.Д.Искин, Г.В.Арзамасцев, Л.Ф.Кучин, В.А.Грабина // Открытия. Изобретения. - 1985. - № 28. - С. 165.
6. А.с. 1341559 СССР, МКИ⁴ G 01 N 22/00. Устройство для исследования свойств биологической среды / В.Д.Искин, С.В.Руденко // Там же. - 1987. - № 36. - С. 202.
7. А.с. 1305609 СССР, МКИ⁴ G 01 R 27/26. Устройство для измерения параметров диэлектриков / В.Д.Искин // Там же. - № 15.- С. 184.
8. А.с. 1209239 СССР, МКИ⁴ А 61 N 5/02. Способ определения частот для воздействия на биологические ткани / В.Д.Искин, Л.П.Демина, П.А.Клейман и др. // Там же. - 1986. - № 5.- С.36.
9. Искин В.Д., Медведовский А.В. Разработка и экспериментальная апробация кювет для микроволновой обработки биологических систем // Рук. деп. в ВИНИТИ. - 1987. - № 2616-В87. - С. 19.
10. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. - М.: Физматгиз, 1963. - 404 с.
11. Маркузе Д. Оптические волноводы. - М.: Мир, 1974. - 576 с.
12. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. - М.: Связь, 1978. - 432 с.
13. Буткус Г.Т., Никалаускас К.К., Пaужа А.С. Измерение пространственного распределения электрического поля миллиметрового диапазона в биологических структурах // Медико-биологические аспекты миллиметрового излучения / Под ред. Н.Д.Девяткова. М., 1987. - С. 230-234.

УДК 621.391

Г.А.Андреев, Г.А.Гладышев

ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ НА РАССЕЯНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ РАДИОВОЛН

Методы дистанционного зондирования земных покровов в радиоволновом диапазоне получают в настоящее время все большее развитие с применением аппаратуры, устанавливаемой как на наземных подвижных платформах, так и на летательных аппаратах [1-4]. При обработке и интерпретации получаемой с таких систем информации существенным оказывается влияние неровностей земных покровов на их тепловое излучение и рассеяние излучения толщи атмосферы. В настоящей работе на основе использования плоского альбедо и интегрального коэффициента рассеяния приведены количественные оценки влияния неровностей поверхности на излучение земного покрова и рассеяния ими излучения толщи атмосферы в активном и пассивном зондировании.

Геометрическая схема расположения приемопередающей аппаратуры приведена на рис.1. Из обобщенной формулы Кирхгофа теплового излучения полубесконечной среды с гладкой границей раздела в приближении Рэлея - Джинса для яркостной температуры получаем

$$T_{в,г}(\theta) = \left(1 - |V(\theta)|^2_{в,г}\right) T = æ_{в,г}(\theta) T, \qquad (1)$$

где T - температура среды; $æ_{в,г}(\theta) = 1 - |V(\theta)|^2_{в,г}$ - коэффициент излучения среды;

$$V_в(\theta) = \frac{\varepsilon' \cos\theta - \sqrt{\varepsilon' - \sin^2\theta}}{\varepsilon' \cos\theta + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2\theta}};$$

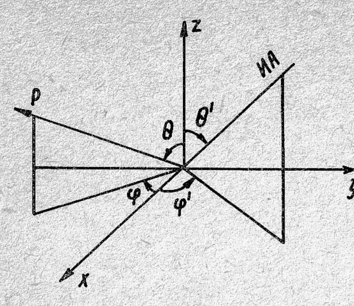


Рис.1. Геометрическая схема расположения системы пассивного дистанционного зондирования: Р – к радиометру; ИА – излучение атмосферы

$$V_r(\theta)=\frac{\cos\theta-\sqrt{\varepsilon'-\sin\theta'}}{\cos\theta+\sqrt{\varepsilon'\sin^2\theta'}}.$$

Френелевские коэффициенты отражения волны с вертикальной (в) и горизонтальной (г) поляризациями среды, с комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) имеют вид

$$\varepsilon'=\varepsilon+i\varepsilon''. \qquad (2)$$

Мы выбрали знак "плюс", как и у плоской волны e^{ikz} (гармонической по времени $e^{-i\omega t}$), распространяющейся в положительном направлении оси z.

В диапазоне от миллиметровых (мм) до дециметровых (дм) волн диэлектрическая проницаемость атмосферы ε'_a (как смеси газов) описывается соотношениями, полученными из молекулярно-кинетических представлений [1, 3]. Взаимодействие молекул в диэлектрических проводящих жидких (морская вода), мягких (кожа, мышечные ткани биообъектов) средах, твердых (кварц, стекло), сыпучих (песок, грунт) материалах удовлетворительно описывается теорией релаксационных процессов [5].

Выражение для КДП морской воды (или биоткани) по Дебаю [5] записывается в виде

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_=-\varepsilon_\infty}{1+i\omega\tau}-\frac{\sigma}{i\omega\varepsilon_0}. \qquad (3)$$

Из соотношения (3) получаются следующие выражения для действительной ε и мнимой ε'' составляющих:

$$\varepsilon=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_=-\varepsilon_\infty}{1+(\omega\tau)^2},$$

$$\varepsilon''=\frac{\varepsilon_=-\varepsilon_\infty}{1+(\omega\tau)^2}+\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}. \qquad (4)$$

В (3) и (4) $\varepsilon_=$, ε_∞ – диэлектрические проницаемости в постоянном (=) и гиперчастотном (оптическом) полях; τ – время восстановления (релаксации) положения дипольных молекул после воздействия с частотой ω электромагнитного поля; σ – удельная проводимость.

В морской воде, почве σ зависит от растворенных солей [1]. В отличие от токов проводимости первые члены в (3) характеризуют тепловые потери из-за токов смещения зарядов, упруго связанных с положением равновесия [5]. Для биотканей, влажных смесей почвогрунтов и других сред и материалов на мм волнах затруднительно выделить потери из-за токов смещения и токов проводимости, так как обычно экспериментально [6, 7] определяют действительную и мнимую составляющие диэлектрической проницаемости или эффективную удельную проводимость $\sigma_{эф}=\sigma$. В этом случае предпочитают пользоваться взаимозависимостью в виде

$$\varepsilon''=\varepsilon'_{эф}=\frac{\sigma_{эф}}{\omega\varepsilon_0}=60\lambda\sigma. \qquad (5)$$

Удобным является представление КДП через действительную составляющую и тангенс угла потерь $tg\,\delta$:

$$\varepsilon'=\varepsilon(1+i\,tg\,\delta). \qquad (6)$$

В этом случае комплексный показатель преломления среды записывается в виде

$$n'=\sqrt{\varepsilon'}=n+im,$$

где

$$\left.\begin{matrix}n\\m\end{matrix}\right\}=\sqrt{|\varepsilon'|}\left\{\begin{matrix}\cos\delta/2;\\\sin\delta/2;\end{matrix}\right. \qquad \sqrt{|\varepsilon'|}=\sqrt{\varepsilon^2+\varepsilon''^2}. \qquad (7)$$

Из записи составляющей плоской монохроматической волны в комплексном виде $E_z=e^{ik\sqrt{\varepsilon'}z}=e^{iknz}e^{-kmz}$ следует, что $n=\frac{c_0}{c}=\frac{\lambda_0}{\lambda}$ характеризует показатель преломления, фазовую скорость c и укорочение длины волны в среде по сравнению с вакуумом, а m – ослабление поля на длине волны $\lambda/2\pi$. Погонный коэффициент ослабления интенсивности $\alpha=2km$. При нормальном падении проникновение поля в среду на глубину h_e с уменьшением в $e=2,7$ раз оценивается по соотношению

$$h_e=\frac{\lambda}{2\pi\sqrt{|\varepsilon'|}\sin\delta/2}. \qquad (8)$$

Из (8) видно, что для оценки глубины проникновения (излучения) поля необходимы данные о составляющих КДП. Такие данные для твердых материалов обычно получают экспериментально, а для сыпучих сред из разных компонентов (смесей) – по математическим соотношениям, аппроксимирующим экспериментальные значения на основе регрессионного анализа [1]. Например, для сухого песка выражение КДП приобретает вид

$$\varepsilon'=P\varepsilon'_a+(1-P)\varepsilon'_0, \qquad (9)$$

где $P = 1 - \frac{V_0}{\bar V} = 1 - \frac{\bar\rho}{\rho_0}$ – порозность; $\bar V$, $\bar\rho$ – объем, плотность песка и его основы (V_0, ρ_0, ε_0) (например, стекла или кварца). Измеренная КДП сухого песка на коротких мм волнах (частота около 140 ГГц) [6] при плотности $\bar\rho = 1{,}4$ г/см^3, оказалась $\varepsilon_0' = 3{,}8 + i\,6{,}2\cdot10^{-2}$. Полагая, что основой является материал, аналогичный стеклу ($\varepsilon_0' = 3{,}8 + i\,1{,}9\cdot10^{-2}$, $\rho_0 = 2{,}7$ г/см^3), получаем $P = 1 - \frac{\bar\rho}{\rho_0} \approx 0{,}5$, а по соотношению (9) $\varepsilon' = 2{,}4 + i\,1\cdot10^{-2}$, что по порядку величин удовлетворительно соответствует приведенным экспериментальным данным. В случае влажного песка и волны $8\cdot10^{-3}$ м из соотношения Улаби [1] для составляющих КДП выводятся аппроксимационные зависимости от свободной объемной влажности ρ_m в виде

$$\varepsilon = 42{,}3\,\delta_m, \quad \varepsilon'' = 34{,}7\,\rho_m - 2{,}22 \qquad (10)$$

Запишем зависимость между относительной весовой влажностью $q = \frac{m_W}{m_C} = \frac{m - m_C}{m_C}$ и объемной $\rho_m = \frac{V_m}{V_C}$:

$$\rho_m = q\,\frac{\rho_C}{(\rho_W + \rho_C q)}. \qquad (11)$$

В (10), (11) индексы W обозначают воду, C – сухой, а без индекса – влажный грунт.

Обычно $\delta_C^2 q \ll 1$ и при $\rho_W = 1$ г/см^2 соотношение (11) представляется в виде $\rho_m \approx q\rho_C$.

В [1] приведено более десяти аппроксимирующих выражений для КДП увлажненных почвогрунтов в диапазоне см и дм волн. В зависимости от цели применения соотношения в [1], кроме свободной влажности, содержат: порозность, влажность, завядания, количество связанной влаги, предельную полевую влажность и т.д.

В [7] изложен метод определения КДП по модулю и аргументу коэффициента отражения (прохождения) материала (пахотного слоя) радиоволны с линейной частотной модуляцией.

В [8] приведены модули, аргументы коэффициентов отражения и параметры КДП некоторых природных образований.

Как следует из изложенного, яркостная температура гладкого покрова зависит от КДП среды, его термодинамической температуры и угла наблюдения, что широко используется в системах дистанционного зондирования для определения влажности и температуры природных образований [1 – 4].

На практике, особенно в мм диапазоне, неровности большинства земных покровов сравнимы с длиной волны, поэтому для корректной интерпретации результатов измерений необходимо учесть их влияние

на формирование радиотеплового поля. При больших значениях параметра Рэлея [3] $P = 2k\sigma_3\cos\theta \gg 1$ ($k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; σ_3 – среднеквадратическая высота неровностей поверхности) влияние неровностей учитывается в приближении метода касательной плоскости (МКП). Коэффициент излучения покрова $\text{æ}_{в,г}$ при этом записывается [3, 9] в виде

$$\text{æ}_{в,г}(\theta) = 1 - a_{в,г}(\theta), \qquad (12)$$

где $a_{в,г}(\theta) = \frac{1}{4\pi\cos\theta}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} I^{в,г}(\theta, \theta', \varphi)\sin\theta' d\theta' d\varphi$ – альбедо поверхности; $I(\theta, \theta', \varphi)$ – индикатриса рассеяния поверхности в приближении МКП. Интегрирование в (12) ведется по углам, соответствующим верхней полусфере (см. рис.1). На рис.2 приведены рассчитанные по

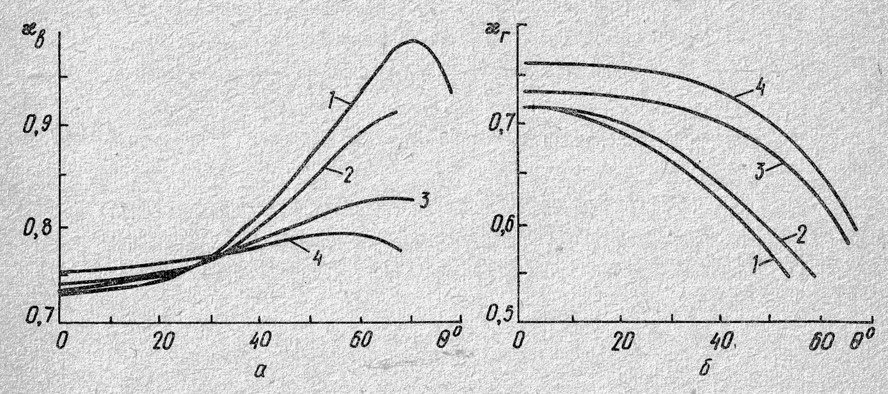


Рис.2. Угловая зависимость коэффициентов излучения песка: 1 – $\sqrt{\langle\gamma^2\rangle} = 0$; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,5; $\varepsilon' = 8{,}5 - i\,4{,}4$

соотношению (2) коэффициенты излучения песка на вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризациях в зависимости от угла наблюдения при различных значениях среднеквадратического тангенса углов наклона неровностей $\sqrt{\langle\gamma^2\rangle}$. Значение КДП было рассчитано по эмпирическим соотношениям (10), полученным обобщением экспериментальных данных [1]. При проведении расчетов КДП была $\varepsilon' = 8{,}5 + 4{,}4$, что соответствует объемной влажности $\rho_m = 0{,}4$.

Для сравнения на рис.2 приведены коэффициенты излучения песка с гладкой границей раздела. Как видно из хода кривых, наличие неровностей приводит к сглаживанию угловой зависимости коэффициентов излучения покрова и уменьшению поляризационных свойств его радиотеплового излучения.

На практике при проведении измерений наряду с собственным ра-

диотепловым излучением покрова на вход радиометра поступает рассеянное поверхностью тепловое излучение толщи атмосферы.

Из соображений сохранения энергии при взаимодействии излучения с поглощающей (излучающей) средой (атмосфера, почва и т.д.) для спектральной яркости выводилось уравнение переноса излучения, решение которого в одномерном случае получается в интегральном виде [1, 3].

В радиоволновом диапазоне (от дм до мм волн) тепловая энергия kT частиц среды больше энергии кванта hf. На этом основаны представления о тепловом электромагнитном поле как флуктуационном, возникающем из-за хаотического, теплового движения заряженных частиц среды [1, 3]. При этом планковская спектральная яркость в первом приближении описывается законом Рэлея – Джинса.

В этом приближении выражение для яркостной температуры поглощающей, но нерассеивающей среды, например толщи атмосферы при наблюдении с Земли под углом θ от вертикали, записывается в виде

$$T_я(z_0) = \sec\theta \int_0^{z_0} \alpha(z) T(z) \exp\left[-\sec\theta \int_z^{z_0} \alpha(z) dz'\right] dz . \qquad (13)$$

Здесь $\alpha(z)$, $T(z)$ – высотные профили погонного поглощения и температуры. Соотношение (13) удобно представлять через интегральное поглощение в зените $\alpha_z = \int_0^{z_0} \alpha(z') dz'$ и интегральную (среднюю) температуру толщи среды

$$\bar{T} = \frac{\int_0^{z_0} \alpha(z) T(z) \exp\left[-\sec\theta \int_z^{z_0} \alpha(z') dz'\right] dz}{\int_0^{z_0} \alpha(z) \exp\left[-\sec\theta \int_z^{z_0} \alpha(z') dz'\right] dz} \qquad (14)$$

в виде $T_я(\theta) = \bar{T}(\theta)(1 - e^{-\alpha_z \sec\theta})$.

Для изотермической среды выражение (13) преобразуется в формулу

$$T(z) = T(z=0) = T = \bar{T} \qquad (15)$$

$$T_я = T\left(1 - e^{-\alpha_z \sec\theta}\right) = \text{æ}(\theta) T , \qquad (16)$$

где $\text{æ}(\theta) = (1 - e^{-\alpha_z \sec\theta})$ – коэффициент излучения слоя среды. В [1, 3] приведены яркостные температуры толщи атмосферы на частотах 1 – 300 ГГц в зависимости от влажности и зенитного угла. Из анализа этих зависимостей следует, что у безоблачной неоднородной атмосферы с приземной температурой 288 К и удельной влажностью ρ=10 г/м^3, интегральным влагосодержанием Q = 20 кг/м^2 яркостная температу-

ра на длинных мм волнах (37,5 ГГц) составляет T_a = 25 К, приземное погонное ослабление γ = 0,12 дБ/км, интегральное ослабление толщи Γ = 4,34, α_z = 0,42 дБ ($\alpha_z \sim 0{,}1$), на коротких мм волнах (140 ГГц) соответственно T_a = 130 К, γ = 1,5 дБ/км, Γ = = 3 дБ ($\alpha_* = \alpha_z \approx 0{,}7$). Для практики удобно угловые зависимости яркостной температуры выражать через температуру в зените $T_z = T_я$ в виде

$$T_я(\theta) = T_z \frac{(1 - e^{-\alpha_z \sec\theta})}{1 - e^{-\alpha_z}} . \qquad (17)$$

В естественных условиях приема радиоизлучения толщи атмосферы с увеличением зенитного угла на вход антенны радиометра поступает излучение окружающих местных предметов. Для измерения яркостной температуры толщи атмосферы при больших зенитных углах (малых углах места) удобна методика приема сфокусированной антенной отраженного металлическим листом излучения атмосферы [10]. Из данных [10] следует, что при зенитных углах $\theta \geq 87^\circ$ яркостные температуры толщи атмосферы и покрова становятся одинаковыми. При гладкой границе раздела сред влияние атмосферы учитывается аддитивной добавкой в (1). Яркостная температура покрова в этом случае выражается в виде

$$T_{в,г} = \text{æ}_{в,г}(\theta) T_п + |V_{в,г}(\theta)|^2 T_a(\theta) = \text{æ}_{в,г} T_п = (1 - \text{æ}_{в,г}) T_a(\theta) . \qquad (18)$$

Здесь $T_a(\theta)$ – угловая зависимость яркостной температуры неба. При ясном небе, когда величина интегрального ослабления мала, яркостная температура неба приближенно описывается законом секанса [3]: $T_a(\theta) \approx T_z \sec\theta$, где T_z – яркостная температура атмосферы при наблюдении в зенит. Как показывают выполненные расчеты для песка с объемной влажностью ρ_m = 0,4 и при T_a = 30 К, величина добавки в (18), связанная с влиянием атмосферы, может достигать ~ 10 К.

При наличии неровностей поверхности необходимо учитывать рассеяние покровом излучения источника, непрерывно распределенного по небесной полусфере. Индикатриса рассеяния такого источника содержит тензорные компоненты, измененные [11] по сравнению с индикатрисой рассеяния падающей плоской электромагнитной волны [9]. Яркостная температура поверхности с хаотическими неровностями при наличии излучения толщи атмосферы записывается в виде [3, 11]

$$\tilde{T}_{в,г}(\theta) = \tilde{\text{æ}}_{в,г}(\theta) T_п + a_s^{в,г}(\theta) T_z , \qquad (19)$$

где

$$a_s^{в,г}(\theta)=\frac{1}{4\pi\cos\theta}\int_0^{\pi}d\varphi'\int_0^{\pi/2}T_s^*(\theta')\left[I_в(\varphi',\theta',\theta)+I_г(\varphi',\theta',\theta)\right]\sin\theta'd\theta' \ -$$

интегральный коэффициент рассеяния теплового излучения толщи атмосферы; $I_{в,г}(\theta,\theta',\varphi)$ – индикатриса рассеяния излучения источника, непрерывно распределенного по небесной полусфере.

На рис.3 приведены угловые зависимости интегрального коэффициента рассеяния песка со среднеквадратическим тангенсом угла наклона неровностей и для сопоставления – угловые зависимости альбедо поверхности. Видно, что различия между альбедо и соответствующим интегральным коэффициентом рассения возрастают с увеличением угла наблюдения.

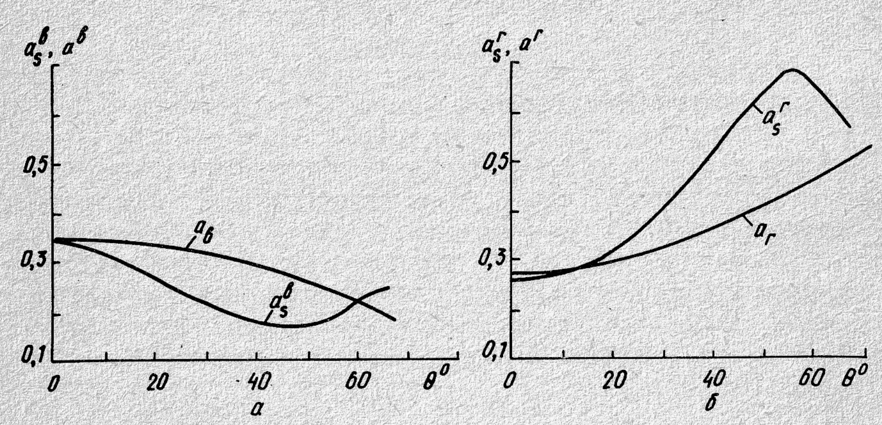


Рис.3. Зависимость от угла падения интегрального коэффициента рассеяния и альбедо: а – вертикальная поляризация; б – горизонтальная поляризация; $\sqrt{\langle \gamma^2 \rangle} = 0,23$; $\varepsilon' = 8,5 + i\,4,4$

Описанный подход позволяет получить удобные соотношения, описывающие контрасты радиотеплового поля различных типов покровов (песок, суглинок и т.п.), что важно для практического землепользования, в частности для получения почвенных карт дистанционными радиометодами. Выражение для разности яркостных температур двух различных покровов с одинаковой термодинамической температурой имеют вид

$$\Delta T^{в,г}(\theta)=T_- a_-^{в,г}(\theta)+(\Delta a_{s_1}^{в,г}(\theta) \ - \Delta a_{s_2}^{в,г}(\theta)) + T_\varphi \, , \qquad (20)$$

где $T_- = T_п - T_г$ – контрастообразующая температура; $a^{в,г}$ – разность между плоским альбедо и интегральным коэффициентом рассеяния поверхности; T_φ – нескомпенсированная при измерениях разница фоновых температур покровов [3].

Полученные соотношения и количественные оценки позволяют проводить оперативную обработку и интерпретацию данных агромониторинга в системах автоматизированного управления сельскохозяйственными комплексами.

1. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing: Active and Passive // Artech Hause (Washington). - 1986. - 3. - P. 1098-1103.
2. XV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн: Тез. докл. – М.: Наука, 1987. – 446 с.
3. Андреев Г.А. Тепловое излучение миллиметровых волн земными покровами // Зарубеж. радиоэлектрон. – 1982. – № 12. – С.3-38.
4. Андреев Г.А., Бородин Л.Ф., Рубцов С.Н. Радиояркостные контрасты земных покровов на миллиметровых и сантиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. – 1980. – 23, № 10. – С. 1266-1268.
5. Фрелих Г. Теория диэлектриков. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 252 с.
6. Исследования диэлектрических свойств земных покровов на миллиметровых волнах / Г.А.Андреев, В.В.Мариакри, Г.А.Гладышев и др. // Радиотехника. – 1979. – 34, № 5. – С. 84-85.
7. Измерение диэлектрических параметров почвы и других сред с применением ЛЧМ-сигнала // Г.А.Андреев, Г.А.Гладышев,С.А.Клыгин и др. // XV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. – М.: Наука, 1987. – С. 385.
8. Миллиметровые волны и их применение // Зарубеж. радиоэлектрон. 1984. – № 11. – 252 с.
9. Андреев Г.А., Куковкин А.Г., Черная Л.Ф. Альбедо и индикатрисы рассеяния ММВ земными покровами с хаотическими неровностями // Радиотехника и электрон. – 1988. – 33, № 7. – С. 1352-1359.
10. Андреев Г.А., Заенцев Л.В., Яковлев В.В. Дистанционный контроль интегрального ослабления миллиметровых волн в атмосфере с дождем по тепловому излучению // II Всесоюз. школа-симпозиум по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере: Тез. докл. – Фрунзе: ИЛИМ, 1986. – С. 226-229.
11. Андреев Г.А., Гладышев Г.А., Черная Л.Ф. Интегральный коэффициент рассеяния неровной поверхностью покрова теплового излучения толщи атмосферы // XV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. – М.: Наука, 1987. – С. 387.

УДК 551.46.0:629.78

Г.А.Андреев, С.Г.Агратин, Г.А.Гладышев, О.К.Станкевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕПЛОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

В проблеме интенсификации и комплексной автоматизации сельского хозяйства важное значение приобретают методы дистанционного контроля температурного состояния почвы [1, 2]. На основе теоретических оценок и экспериментальной проверки в данной работе обосновывается возможность применения дистанционных поляризационных измерений собственного теплового излучения пахотного слоя открытых почвогрунтов для оперативного контроля их термодинамической температуры.

Широкое применение получили методы определения температуры земных покровов $T_п$ по измерениям с самолетов и с искусственных спутников Земли эффективной радиояркостной (далее яркостной) температуры теплового излучения в диапазоне от миллиметровых (мм) до дециметровых (дм) волн [1, 2]. При этом обычно используется соотношение

$$T_{в,г}(\theta) = æ_{в,г}(\theta)\, T_п . \qquad (1)$$

Здесь $æ(\theta)$ – коэффициент излучения, зависящий от диэлектрической проницаемости среды, неровностей границы раздела; $T_{в,г}$ – яркостные температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях; θ – угол наблюдения, отсчитываемый от вертикали. Для среды с гладкой границей раздела коэффициенты излучения в (1) выражаются через френелевские коэффициенты отражения $V(\theta,\varepsilon')$ плоской волны [1, 2] в виде

$$æ_{в,г}(\theta,\varepsilon') = 1 - |V(\theta,\varepsilon')|^2_{в,г} , \qquad (2)$$

где $\varepsilon' = \varepsilon + i\varepsilon''$ – комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) среды. По известной величине КДП и измеренной яркостной температуре покрова по соотношениям (1) и (2) оценивают его физическую температуру. Однако существующая в практике дистанционных измерений неопределенность КДП приводит к значительным ошибкам в определении физической температуры по соотношениям (1), (2). Это обусловлено существенной зависимостью КДП покрова от его увлажненности. Известные полуэмпирические модели [2] КДП почвы наряду с влажностью содержат такие параметры, как порозность, точка завядания, связанная влага, предельная полевая влагоемкость и др. Множество

независимых параметров затрудняет практическое применение таких моделей. Для непосредственного определения удобно пользоваться эмпирическими формулами, содержащими объемную влажность почвогрунта и некоторые коэффициенты регрессии. Так, из анализа экспериментальных данных [2] для песчаных почв на длинных мм волнах были получены удобные соотношения, описывающие с точностью 5 % зависимость КДП от объемной влажности ρ_m при $\rho_m > 0{,}06$:

$$\varepsilon = 42{,}3\,\rho_m , \quad \varepsilon'' = 34{,}7\,\rho_m - 2{,}25 . \qquad (3)$$

Выражения (3) позволяют оценить погрешность вычисления термодинамической температуры по соотношениям (1), (2) из-за неопределенности изменчивости влажности почвогрунтов. На рис.1 приведены теоретические зависимости коэффициентов излучения песка с гладкой границей раздела от объемной влажности при наблюдении под углом 45° и в надир (кривая 3). Как следует из рис. 1, отсутствие точной априорной информации о влажности покрова может привести к большим (до 30 К) ошибкам при определении его термодинамической температуры по соотношениям (1), (2). Для исключения необходимости использования априорных данных о коэффициенте излучения в (1) оказались целесообразными [1, 3, 4] по аналогии с поляризационными измерениями в оптике [5, 6] определение яркостных температур $T_{в,г}$ на ортогональных поляризациях под углом 45° и оценка термодинамической температуры покрова по поляризационному соотношению для температур:

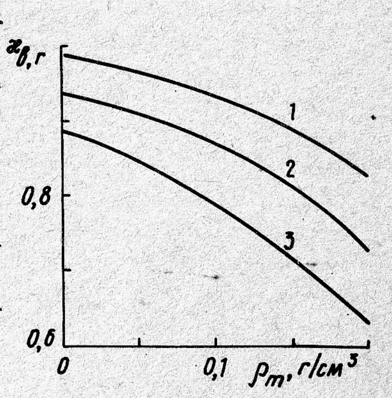


Рис.1. Зависимость от влажности коэффициентов излучения песка с гладкой границей раздела: 1 – вертикальная поляризация, $\theta = 45°$; 2 – горизонтальная поляризация, $\theta = 45°$; 3 – $\theta = 0$

$$T_{в,г} = \frac{T_г^2}{2T_г - T_в} . \qquad (4)$$

Выражение (4) отличается от соответствующего соотношения в [5], где использовалась взаимозависимость

$$|V|^2_г = |V|_в \qquad (5)$$

при угле 45° для светящегося (нагретого) металла с гладкими границами раздела и выраженными поляризационными свойствами. Из (5) в

[5] было получено выражение разности температуры светящегося металла и яркостной температуры его поляризованного оптического излучения в приближении закона излучения Вина. В радиодиапазоне в приближении Рэлея - Джинса спектральная яркость пропорциональна яркостной температуре, а не линейной экспоненциальной функции, соответствующей закону излучения Вина. Поэтому для коэффициентов излучения получается простое поляризационное соотношение $\Pi_{æ}$ [1,3,4]

$$\Pi_{æ} = \frac{æ_г^2}{2æ_г - æ_в}, \qquad (6)$$

которое при угле $\theta = 45^\circ$ является инвариантом $\Pi_{æ} = \Pi_и = 1$ для гладких покровов с ограниченной КДП и обладающих поляризационными свойствами излучения (отражения). В условиях выполнения поляризационного инварианта ($\Pi_{æ} = 1$) и в отсутствие излучений окружающих предметов, толщи атмосферы, осадков поляризационное соотношение для яркостных температур (4), следующее из (6), совпадает со значениями термодинамической температуры покрова:

$$T_{в,г} = \Pi_и T_п = T_п . \qquad (7)$$

Соотношения (4), (7) позволяют оперативно оценивать физическую температуру покрова по измерениям его яркостной температуры на двух ортогональных поляризациях под углом 45°.

Реально при радиометрических наблюдениях на антенную систему наряду с радиотепловым излучением покрова поступает также переотраженное поверхностью излучение толщи атмосферы:

$$T_{в,г}(\theta) = æ_{в,г}(\theta) T_п + |V(\theta)|^2_{в,г} T_a(\theta), \qquad (8)$$

где $T_a(\theta)$ - угловая зависимость яркостной температуры неба. В этом случае термодинамическая температура покрова определяется по соотношению

$$T_п = \frac{(T_г - T_a)^2}{2T_г - T_в - T_a} + T_a . \qquad (9)$$

Здесь все яркостные температуры, как и прежде, берутся при угле 45°. Все величины, входящие в соотношение (9), измеряются, что делает его удобным для практической оценки физической температуры покровов при наличии подсвечивающего излучения толщи атмосферы. Наличие неопределенности в значении величины T_a приводит к ошибкам в определении температуры покрова. На рис.2 представлена зависимость абсолютной ошибки $\Delta T_п$ в определении температуры покрова по соотношениям (4), (7) от величины яркостной температуры

неба. Как видно из хода кривых, большие значения влажности, увеличивая отражательную способность, приводят к росту погрешности измерений физической температуры.

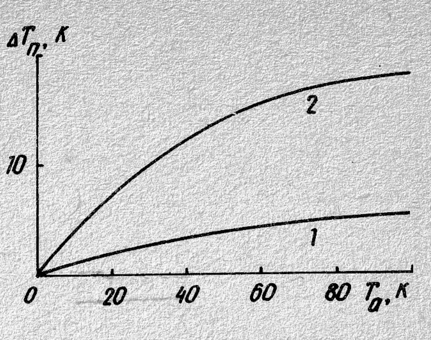


Рис.2. Зависимость абсолютной ошибки $\Delta T_п$ от величины яркостной температуры неба при угле наблюдения $\theta = 45^\circ$: 1 песок, влажность $\rho = 0,1$ ($\varepsilon' = 4,2 + i1,2$); 2 - песок, влажность $\rho = 0,2$ ($\varepsilon' = 8,5 + i4,4$)

Исходя из реально встречающихся значений влажности и яркостных температур атмосферы на длинных мм волнах [2, 3], максимальная абсолютная погрешность $\Delta T_п = 3$-12 К, поэтому для повышения точности измерений температуры целесообразно пользоваться соотношением (9).

Приведенные выражения точны лишь для гладких поверхностей раздела сред. На формирование радиотеплового излучения покрова, особенно в мм диапазоне, существенно влияют неровности границы раздела. Наличие неровностей приводит к сглаживанию угловой зависимости коэффициентов излучения $\tilde{æ}_{в,г}(\theta)$ [6, 7]. В этом случае поляризационное соотношение (6) при $\theta = 45^\circ$ уже не обращается в инвариант, а выражается [4] в виде

$$\tilde{\Pi}(\Delta æ, æ) = \frac{\tilde{æ}_г^2}{2\tilde{æ}_г - \tilde{æ}_в} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta æ_г}{æ_г}\right)^2}{1 + \frac{2æ_г}{æ_г^2} + \frac{\Delta æ_в}{æ_в^2}}, \qquad (10)$$

где $\tilde{æ}_в = æ_в - \Delta æ_в$, $\tilde{æ}_г = æ_г + \Delta æ_г$, $\Delta æ_{в,г}$ - вариация коэффициента излучения из-за хаотических неровностей границы раздела сред. Неровности покрова со среднеквадратичными значениями высот несколько сантиметров в диапазоне дм волн учитываются на основе решения задачи рассеяния в приближении метода возмущений (МВ) [3]. В приближении МВ вклад рассеяния неровностями покрова в отраженное поле на десятки децибел меньше отражения когерентной составляющей, поэтому соответствующие поправки $\Delta æ_{в,г}$ малы. В диапазоне мм волн такие неровности являются крупномасштабными по сравнению с длиной волны и их влияние оценивается в приближении метода касательной плоскости (МКП) [6, 7]. Коэффициент излучения в этом случае [3]

$$\tilde{æ}_{в,г}(\theta) = 1 - a_{в,г}(\theta), \qquad (11)$$

где $a_{в,г}(\theta) = \frac{1}{4\pi \cos\theta} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} I_{в,г}(\theta, \theta', \varphi) \sin\theta' d\theta$ - альбедо поверхности; $I(\theta, \theta', \varphi)$ - индикатриса рассеяния в приближении МКП [3]; φ - азимутальный угол.

Относительная погрешность определения температуры покрова по

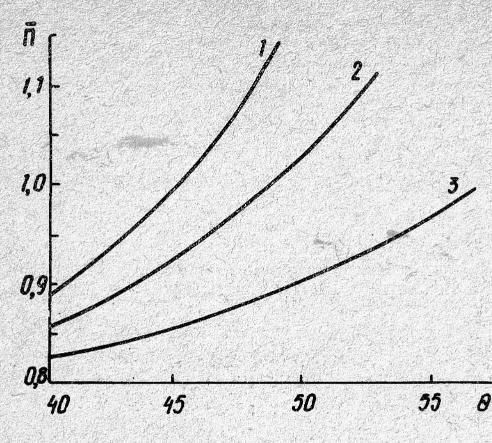


Рис.3. Зависимость поляризационных соотношений (6) и (10) от угла наблюдения для различных неровностей: 1 – $\sqrt{\langle\gamma^2\rangle}$ = 0; 2 – 0,2; 3 – 0,3

соотношению (6) при наличии неровностей записывается в виде

$$\frac{\Delta T_п}{T_п} = 1 - П(\Delta æ, æ) =$$

$$= \Delta П(\Delta æ, æ) . \quad (12)$$

Из анализа кривых на рис.3 с учетом (11) следует, что наличие неровностей приводит к значительным погрешностям: $\Delta П$ = 0,075 при $\sqrt{\langle\gamma^2\rangle}$ = 0,2 и $\Delta П$ = 0,15 при $\sqrt{\langle\gamma^2\rangle}$ = 0,3. Для уменьшения влияния неровностей целесообразно использовать более длинноволновые по сравнению с ними участки радиодиапазона.

Учет теплового излучения толщи атмосферы, рассеянного неровностями покрова $T_{в,г}$, удобно осуществлять по интегральному коэффициенту рассеяния $a^s_{в,г}$ [3, 7] и яркостной температурой неба в зените T_z с использованием соотношения

$$T_{в,г}(\theta) = a^s_{в,г}(\theta) T_z . \quad (13)$$

Из решения задачи рассеяния неровными границами земных покровов излучения источника, непрерывно распределенного по небесной полусфере, для коэффициента рассеяния получаем

$$a^s_{в,г}(\theta) = \frac{1}{4\pi \cos\theta} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} T_a^*(\theta') I'_{в,г}(\theta', \theta, \varphi)\, d\theta , \quad (14)$$

где $T_a^*(\theta) = T_a(\theta)/T_z$; $I'_{в,г}$ – индикатриса рассеяния непрерывно распределенного по небесной полусфере источника излучения. С учетом (11), (13 и (14) выражение для эффективной яркостной температуры $T_{в,г}$ неровного покрова с учетом подсвечивающего излучения атмосферы записывается в виде

$$\tilde{T}_{в,г}(\theta) = \tilde{æ}_{в,г}(\theta) T_п + a^s_{в,г}(\theta) T_z . \quad (15)$$

Относительная погрешность определения температуры покрова в этом случае оценивается по соотношению

$$\frac{\Delta T_п}{T_п} = 1 - \frac{(æ_г T_- + \Delta æ_г T_п + T_z(1+\Delta a_г))^2}{(T_-(2æ_г - æ_в) + T_п(2\Delta æ_г - \Delta æ_в) + T_z(2\Delta a_г - a_в) + T_z) T_п} , \quad (16)$$

где $T_- = T_п - T_z$ – контрастообразующая температура [3, 8].

Анализ соотношения (16) показывает, что совместное влияние излучения толщи атмосферы и неровностей поверхности может приводить к их взаимокомпенсации. Например, для сухого песка (ε' = = 2,5 + i 0,06) со среднеквадратичными тангенсами углов наклона неровностей $\sqrt{\langle\gamma^2\rangle}$ = 0,1 и термодинамической температурой $T_п$=290 К в отсутствие подсвечивающего излучения атмосферы погрешность в определении температуры составляет $\Delta T_п \sim 1$ К. При наличии излучения атмосферы с T_z = 30 К эта ошибка уменьшается до $\Delta T_п \sim$ 0,04К, что приемлемо для практических измерений.

Экспериментальная проверка метода была осуществлена по определению температуры песчаного покрова с $\sqrt{\langle\gamma^2\rangle}$ = 0,1. Измерения проводились в натурных условиях при ясном небе. Высота расположения радиометрической аппаратуры составляла 1,5 м, угол наблюдения θ = 45°, диаметр антенного пятна $l \approx$ 0,3 м. Калибровка производилась по абсолютно черному телу при температуре окружающей среды и охлажденному жидким азотом (Т = 279 К и Т = 77 К).

На рис.4 приведены фрагменты записи радиояркостной температуры покрова на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Термодинамическая температура покрова, измеренная термометром, заглубленным на 2 см, составила $T_п$ = = 279 К. Вычисленные для этих исходных данных по соотношению (16) погрешности в определении температуры покрова составляют $\Delta T_п$ = = 2,5 К, в то время как в эксперименте (см. рис.4) получена разность между температурой, рассчитанной из поляризационных измерений, и измеренной термометром: $\Delta T_п$ = 4 К.

Таким образом, наблюдается удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных оценок погрешностей. Это указывает на возможность эффективного использования поляризационных ра-

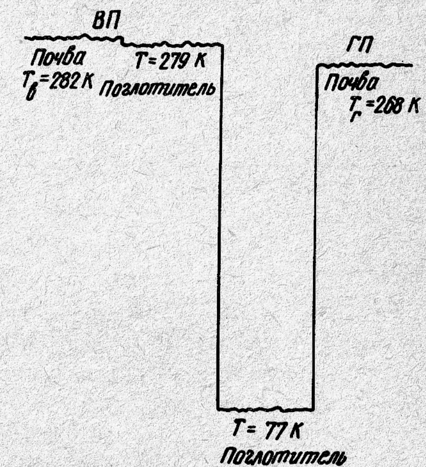


Рис.4. Фрагменты записи радиояркостных температур: ВП и ГП – вертикальная и горизонтальная поляризации

диометрических измерений для дистанционного определения термодинамической температуры земных покровов без растительности при достаточной точности установки угла наблюдения. В случае больших неровностей поверхности (вспаханное поле и т.п.) для уменьшения возникающих погрешностей в определении температуры целесообразно использовать более длинноволновые (дм волны) участки радиодиапазона.

1. Богородский В.В.,Козлов А.И. Микроволновая радиометрия земных покровов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 221 с.
2. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing. Active and passive // Artech House (Washington). - 1986. - 3.- P. 1098-1103.
3. Андреев Г.А. Тепловое излучение миллиметровых волн земными покровами // Зарубеж. радиоэлектрон. – 1982. – № 12. – С. 3-39.
4. О дистанционном определении температуры земных покровов по поляризационному инварианту СВЧ-радиотеплового излучения /Г.А.Андреев, Л.Ф.Бородин, Л.В.Зайцев и др. // Исследования Земли из космоса. – 1984. – № 4. – С. 120-123.
5. Tingwaldt C., Schley U. Eine optische Metode zur directen Ermitlung der wahren Temperatur glühender Metalle // Z. Instr.- 1961. - 69, N 7. - S. 205-207.
6. Андреев Г.А., Черная Л.Ф. Рассеяние излучения миллиметровых волн природными объектами // Радиотехника. – 1988. – 43, № 3.– С. 62–68.
7. Андреев Г.А., Гладышев Г.А., Черная Л.Ф. Интегральный коэффициент рассеяния неровной поверхностью покрова теплового излучения толщи атмосферы // XV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. – М.: Наука, 1987. – С. 387.
8. Андреев Г.А., Бородин Л.Ф., Рубцов С.Н. Радиояркостные контрасты земных покровов на миллиметровых и сантиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. – 1980. – 23, № 10. – С. 1266–1268.

УДК 551.596.08

В.В.Зверев, Г.П.Ермак, В.В.Россихин, С.Д.Алексеевский

БИОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА И ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время достижения медицинской техники позволяют применять в практике сложные физиологические методы исследования.

В данной работе описана конструкция приборов биокомплекса,составленная из прибора для определения объемной скорости потока биологических жидкостей и прибора для определения давления в полых органах, соединенных с единым регистрирующим устройством.

Учитывая, что биокомплексы отечественной промышленностью не выпускаются, настоящая работа может быть полезной для специалистов, работающих над созданием медтехники, и биологов, изучающих вопросы дистальной уродинамики.

Предлагаемый нами прибор (рис.1) состоит из приемного блока, датчика, преобразователя импульсов и регистрирующего блока.

Приемный блок включает в себя воронку 1, рассекатель 2, который имеет форму усеченного конуса с канавками по краям, и формирователь потока 3, укрепленный на нижнем конце воронки.

Датчик состоит из пластмассового корпуса 7 и заключенной в нем семилопастной крыльчатки 6 с расположенными на ее оси двумя магнитами 5. Лопасти крыльчатки особой формы, благодаря чему обеспечивается достаточная чувствительность прибора.

Рис.1. Прибор для определения объемной скорости потока

На одной из стенок корпуса датчика расположен геркон 4, соединенный с преобразователем импульсов и регистрирующим устройством.

Принцип работы данного прибора заключается в том, что жидкость, поступая в воронку, равномерно распределяется по ее стенкам с помощью рассекателя, наличие которого исключает турбулентность движения потока, а формирователь потока обеспечивает равномерность подачи ее на лопасти крыльчатки.

Под воздействием струи жидкости крыльчатка вращается. На одной оси с ней расположены два магнита. Создаваемое ими магнитное поле с частотой, в два раза большей частоты вращения крыльчатки, включает геркон. Он замыкает цепь: "+" источника питания – геркон – резистор Р1 – "–" источника питания (рис.2).

На резисторе видим положительные импульсы с частотой следования, равной частоте включения геркона. Длительность этих импульсов зависит от скорости вращения крыльчатки. Через дифференцируемую цепочку, собранную на С1, R2, и ограничивающий резистор Р3 импульсы поступают на базу транзистора VT1. На транзисторе VT1, а также на VT2, VT3 собран формирователь импульсов. Он позволяет получить импульсы постоянной длительности. Дифференцирующая цепочка, включенная на входе, формирует короткие запускающие импульсы.

В исходном состоянии на выходе формирователя устанавливается

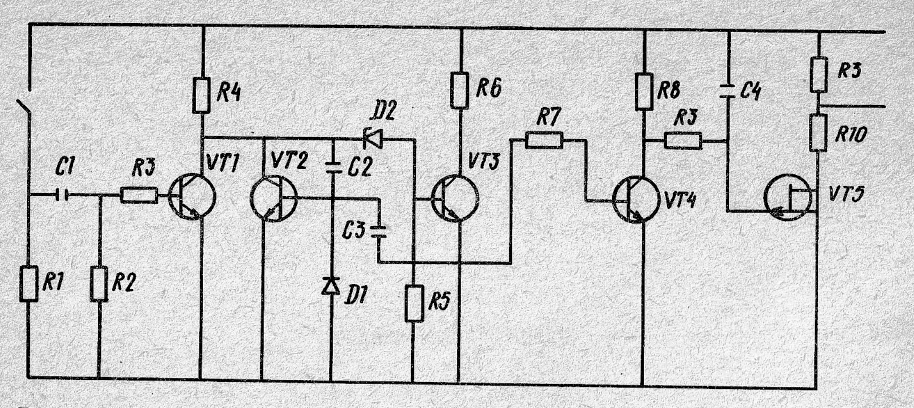


Рис.2. Принципиальная схема преобразователя импульсов

низкий потенциал. Транзистор VT3 открыт током, текущим по цепи "+" источника питания - Р4-VT2 - база VT3, транзисторы VT1,VT2 закрыты. С приходом положительного импульса транзистор VT1 открывается, а VT3 закрывается. Конденсатор С2 через открытый транзистор VT1 соединен с землей и разряжается. После окончания запускающего импульса транзистор VT1 закрывается, конденсатор С2 начинает заряжаться по цепи "+" источника питания - R4 - С2 - база транзистора VT2. Этот каскад представляет собой интегратор, поэтому конденсатор заряжается по линейному закону.

По окончании заряда конденсатора транзистор VT2 закрывается, а VT3 открывается.

К выходу формирователя импульсов подключен электронный ключ, собранный на транзисторе VT4. Через открытый ключ заряжается конденсатор С4 по цепи "+" источника питания - С4 - R9 - VT4. Сигнал с конденсатора поступает на вход истокового повторителя, собранного на транзисторе VT5. С делителя напряжения R10, R11 сигнал поступает на вход регистрирующего прибора.

Предлагаемый прибор позволяет определять объемную скорость тока жидкостей в пределах 0,0001-0,004 $м^3/с$ (1-40 мл/с) при погрешности измерений ± 7 %, кроме того, производится графическая регистрация объемной скорости потока.

Калибровка прибора осуществляется достаточно простой и быстрой методикой. Источник воды - обычный лабораторный кран. Истинную скорость определяют путем измерения объема воды в градуированном цилиндре за данный период времени (1-30 с). Время регистрируется лабораторным секундомером.

Исследования повторяют до получения двух идентичных результатов. Струю воды направляют в коллекторную воронку прибора и регистрируют скорость ее течения. Постоянство скорости течения проверяют с помощью измерительного цилиндра и секундомера. Общее расхождение составляло 1,6 %.

Второй составной частью биокомплекса является прибор для определения давления. Основная часть этого прибора - электроманометр. Предлагаемый нами электроманометр позволяет регистрировать колебания давления внутри полых органов практически без искажений за счет уменьшения рабочего объема мембранного датчика и использования жесткой мембраны.

Основным узлом предлагаемого электроманометра является датчик давления с пределами измерений 0 - 20 Па при погрешности измерений ± 10 %.

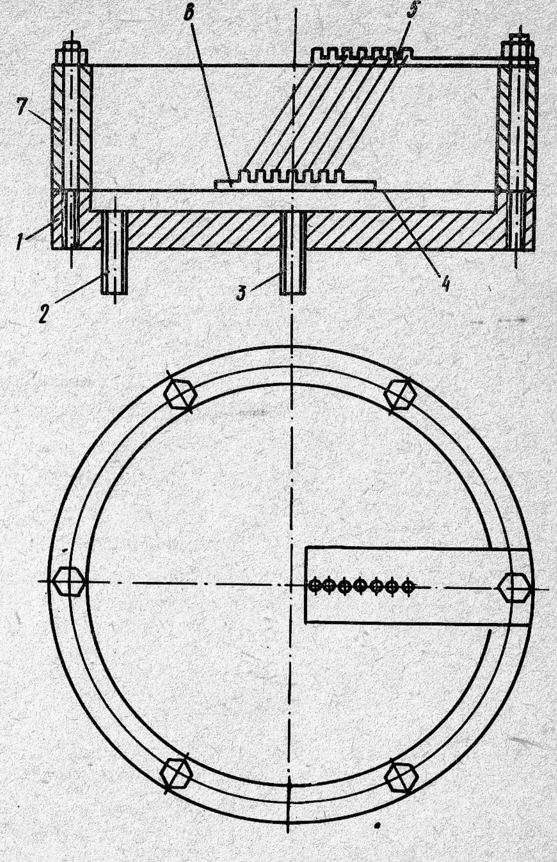


Рис.3. Прибор для измерения давления

Датчик давления (рис.3) представляет собой металлический корпус 1 с внутренним объемом 0,9 мл. Имеет два штуцера: 3 - для присоединения к катетеру и 2 - для удаления пузырьков воздуха из полости.

Рабочим органом датчика служит мембрана 4 из бериллиевой бронзы толщиной 0,1 мм, на которую с внешней стороны нанесен фольговый тензодатчик 6 типа ФКМВ-20-100. Выводы тензодатчика соединены с клеммами 5. Достаточная жесткость мембраны и подобранный рабочий объем датчика позволяют использовать для передачи давления от полого органа к датчику укороченные катетеры диаметром 2-4 мм, длиной 300-350 мм, что не вносит динамических искажений при записи изменений давления. Электрическая блок-схема включения датчика

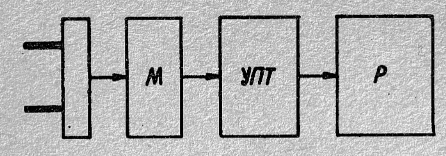


Рис.4. Блок-схема тензодатчика

представлена на рис.4. Тензодатчик включен в два плеча уравновешенного моста (М), к выходу которого подключается усилитель постоянного тока (УПТ), обеспечивающий надежную регистрацию сигналов разбаланса моста самопишущим регистратором (Р).

Электроманометр работает следующим образом: перед началом измерений датчик с помощью штатива устанавливают на уровне дна исследуемого органа по принципу сообщающихся сосудов. Пропуская жидкость через штуцер 3 (рис. 3), вытесняют весь воздух из внутренней полости 7, после чего штуцер 2 перекрывают.

В процессе наполнения любого полого органа давление жидкости в нем передается его мембране. В результате она изгибается, что приводит к изменению сопротивления тензодатчика и разбалансу моста, в плечо которого он включен. Сигнал, получаемый с диагонали моста, усиливается и передается на измерительное устройство с самопишущим регистратором. Калибровка датчика производится с помощью водного манометра.

СОДЕРЖАНИЕ

Рефераты

УДК 621.3.029.65:577.3.2

О молекулярных механизмах взаимодействия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с белками и ДНК. Теория и эксперимент / Малеев В.Я., Кашпур В.А. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами : Сб. науч.тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 3-10.

Обсуждены литературные и оригинальные данные, относящиеся к теоретическому и экспериментальному изучению колебательных состояний белков и ДНК в интервале частот, включающем сантиметровые, миллиметровые и субмиллиметровые волны. Анализ этих данных показал, что хотя теория предсказывает существование различного рода колебаний в этих биополимерах, частоты которых попадают в указанные диапазоны электромагнитных волн, экспериментально такие колебания, как правило, не обнаруживаются. По мнению авторов, для существования острых резонансов в этих биополимерах вообще нет достаточно разумных физических оснований. Что же касается "нормальных" резонансных эффектов (с добротностями порядка 10-100), то такая ситуация в принципе возможна, но для надежного обнаружения таких колебаний требуются дальнейшая разработка чувствительных экспериментальных методов, способных выделить искомые эффекты на фоне преобладающего поглощения водой, и развитие теоретических моделей, максимально учитывающих реальные экспериментальные условия. Библиогр.: 30 назв.

УДК 621.3.029.65:577

Метод измерения диэлектрической проницаемости в миллиметровом диапазоне растворов биоматериалов в зависимости от температуры / Глибицкий Г.М., Кашпур В.А. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 10-14.

Разработан диэлектрометр миллиметрового диапазона, предназначенный для изучения биоматериалов в температурном интервале 5 - 90 °С. Измерения комплексной диэлектрической проницаемости производятся волноводным мостовым методом при использовании кюветы переменной толщины. Непосредственно определяемыми величинами явля-

ются поглощения и фазовая постоянная. Точность измерений составляет 2-3 %. С помощью данного диэлектрометра исследованы диэлектрические свойства воды и водных растворов некоторых биологических веществ в диапазоне длин волн 6-8 мм и температурном интервале 20-80 °С. Ил.1. Табл.4. Библиогр.: 7 назв.

УДК 577.35:537

Новый высокоэффективный метод контроля функционального состояния биообъектов / Банников В.С., Веденский О.Ю., Ермак Г.П., Абраменко И.С., Колесник О.Л., Скрынник Б.К., Шестопалов В.П. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами : Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 15-20.

Предложен метод контроля функционального состояния биообъектов с помощью автодинного генератора дифракционного излучения. Проведено экспериментальное исследование характеристик рассеивания СВЧ сигналов сетчаткой глаза Rana temporaria при воздействии светового стимула. Ил.4. Библиогр.: 7 назв.

УДК 538.569:57

Спиновый механизм влияния миллиметрового излучения на биологические процессы / Шияновский С.В. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 20-29.

Исследована кинетика заселенности триплетных подуровней промежуточных продуктов биохимических реакций в процессе облучения с учетом спин-решеточной релаксации. Определены вклады вращения молекул и постоянного магнитного поля в интенсивность межуровневых переходов. Показано, что влияние миллиметрового излучения на организмы через спиновую подсистему возможно только в металлоорганических комплексах ионов переходных металлов. Ил.1. Библиогр.: 20 назв.

УДК 576.315:581.5:575.042

Реакция клеток растений на действие радиоволн миллиметрового диапазона / Шестопалова Н.Г., Головина Л.Н., Петрушин А.А., Корнеенков В.К. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.науч. тр. - Киев: Наук,думка,1989. - С. 29-34.

Приведены данные экспериментальных исследований взаимосвязанных показателей, отражающих изменение физиолого-генетической активности клеток растений после действия радиоволн мм диапазона. Ил.3. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

УДК 577:621.317.335.3.029.64

Применение миллиметровой диэлектрометрии в биологии и медицине / Малая Л.Т., Щеголева Т.Ю., Бахова Л.К. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 35-40.

Работа посвящена сопоставлению результатов исследования методом СВЧ диэлектрометрии молекулярного механизма повреждения аденилатциклазной системы эритроцитов при развитии сердечно-сосудистой патологии с клиническими проявлениями. Ил.4. Библиогр.: 5 назв.

УДК 541.144

Об эффектах воздействия микроволнового электромагнитного излучения на биомолекулярные системы / Сериков А.А.,Христофоров Л.Н.// Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 41-50.

Проведен теоретический анализ возможных механизмов взаимодействия микроволнового электромагнитного излучения с биологическими макромолекулами. Показано, что эксперименты по биологическому действию слабых СВЧ полей можно объяснить в предположении добротности дипольно-активных колебаний в биополимерах, превышающей значения 10^3-10^4. Высказаны соображения о возможной причине столь высоких добротностей колебаний в активных центрах глобулярных биомолекул. Ил.5. Библиогр.: 8 назв.

УДК 621.317

ЭПВ - спектрометр диапазона длин волн 4-1,5 мм / Ворсуль К.В., Смирнова Т.А., Черпак Н.Т. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук, думка,1989.- С.51-53.

Описан спектрометр бегущей волны для исследования ЭПР спектров кристаллов в диапазоне длин волн λ = 4-1.5 мм, в интервале температур 1,7-10 К в магнитных полях до 30 кЭ. Ил.2. Библиогр.: 9 назв.

УДК 57.043

Диэлектрический разогрев криоконсервированных клеточных суспензий в сантиметровом и миллиметровом диапазонах /Бобрышев В.Д., Снурников А.С., Швед В.Б. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка,1989. С. 53-58.

Рассмотрена математическая модель, описывающая процесс диэлектрического разогрева двухфазной системы, состоящей из жидких сферических включений и ледяной матрицы, которая по электрофизическим и теплофизическим характеристикам приближается к реальной криобиологической системе. Показано, что в сантиметровой области СВЧ диапазона диэлектрический разогрев криоконсервированных клеточных суспензий приводит к значительным локальным перегревам в фазовых неоднородностях. Максимум локального перегрева соответствует частотам порядка 50 ГГц, при дальнейшем повышении частоты значение локального перегрева падает. Область применения - криобиология. Ил.5. Библиогр.: 4 назв.

УДК 530.1:534.2:577.3

О взаимодействии вибронно возбужденных биополимеров с внешними электромагнитными полями / Гайдидей Ю.Б. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 58-66.

Излагаются результаты исследований воздействия электромагнитных полей на биополимеры, находящиеся в возбужденных состояниях. Проанализированы конфигурации пептидных групп в α-спиральных биополимерах. Показана возможность управления ими внешним электрическим полем. Изучены самосогласованные состояния внутримолекулярных возбуждений с ориентационными колебаниями пептидных групп. Показано существование трех типов самосогласованных состояний,одно из которых автолокализованное эксимерное, а два других - экситонные (солитонные при учете взаимодействия с деформационными степенями свободы). Проанализированы особенности взаимодействия электромагнитных волн с данными возбужденными состояниями. Библиогр.: 12 назв.

УДК 536; 557; 574; 577

Влияние внешнего электромагнитного поля на процессы упорядочения в средах с биохимическими реакциями / Чалый А.В. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 66-74.

Рассмотрено влияние электромагнитного поля на процесс образования упорядоченных структур в системе с биохимическими реакциями. Определено изменение критических параметров вещества в зависимости от характеристик электромагнитного поля и электродинамических свойств вещества. Доказана возможность перехода физико-химической системы под действием электромагнитного излучения СВЧ или КВЧ диапазонов в упорядоченное состояние. Получены критерии и численные оценки, характеризующие этот переход. Библиогр.: 9 назв.

УДК 57.043

Контрастирование зон холодовой некротизации в сочетании с микроволновым воздействием /Швед Б.В., Бобрышев В.Д. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 74-77.

Предлагается использовать СВЧ излучение, предпочтительно миллиметрового диапазона, для снижения эффекта холодового повреждения здоровых тканей при криодеструкции патологических новообразований. В основу положено существенное различие в коэффициентах поглощения СВЧ для замороженных и незамороженных зон. Используя принятую математическую модель, описывающую процесс замораживания при криодеструкции, на конкретных примерах показано существенное снижение эффекта холодового повреждения здоровых тканей в случае, когда сквозь замороженную зону подается СВЧ излучение миллиметрового диапазона. Область применения - криохирургия.Ил.2. Библиогр.: 3 назв.

УДК 577.3

Возможный механизм работы синапса как неравновесной системы, восприимчивой к влиянию внешних физических полей /Радченко Д.Г., Слабкая И.А. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 77-85.

На основе анализа экспериментальных фактов предложена математическая модель,устраняющая известные противоречия при трактовке механизмов синаптической передачи. В основу ее положена гипотеза о взаимосвязанности кратковременного изменения проводимости ионных каналов при генерации потенциала действия и так называемого фазового расслоения в примембранной области. Последнее явление обусловливает кооперативный характер протекающих процессов и в ряде случаев приводит к резкому повышению восприимчивости системы к воздействию внешних факторов. Библиогр.: 11 назв.

УДК 537.868.536:577.3.08

Абсорбционный метод исследования спектральных неоднородностей в биологических средах / Ордынец А.Г. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989 г. - С. 85-91.

Предложен новый физический метод исследования спектральных неоднородностей в биологических средах. В его основу положена регистрация оптико-акустических процессов, сопровождающих взаимодействия частотно-модулированного излучения со спектрально-неоднородной средой. Теоретически и экспериментально на модельном объекте показаны основные особенности и преимущества метода по отношению к существующим. Область применения - исследование резонансных эффектов взаимодействия микроволнового излучения с биологическими средами. Ил.4. Библиогр.: 8 назв.

УДК 615.47:537.811:616.3

Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения КВЧ диапазона на оптические свойства кожных покровов / Соломонов В.И., Писанко О.И., Мосежный А.Е., Кириченко Г.И., Туранский В.П. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 91-95.

Приводятся сведения о влиянии низкоинтенсивного излучения КВЧ диапазона на оптические свойства кожных покровов в зоне биологически активных точек человека. Вследствие влияния низкоинтенсивного ЭМИ показано, что оно приводит к изменению оптических свойств БАТ, которое связано с увеличением объемного кровотока в этих зонах кожных покровов. Ил.3. Библиогр.: 6 назв.

УДК 615.47:537.811:616.3

Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения КВЧ диапазона на теплопродукцию эпигастральной области /Соломонов В.И., Писанко О.И., Мосежный А.Е., Кириченко Г.И., Туранский В.П. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 96-97.

Приводятся сведения о влиянии низкоинтенсивного излучения КВЧ диапазона на теплопродукцию эпигастральной области у ряда больных гастроэнтерологического профиля. Показано, что воздействие ЭМИ на биологически активные зоны человека приводит к изменению теплопродукции эпигастральной зоны человека, где проецируются основные органы пищеварения: печень, желудок, поджелудочная железа. Библиогр.: 4 назв.

УДК 615.47.537.811:616.3

Низкоинтенсивное электромагнитное излучение КВЧ диапазона в комплексном курортном лечении язвенной болезни /Зелинский В.А., Писанко О.И. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 97-104.

Содержатся данные о влиянии электромагнитного излучения КВЧ диапазона на интактных животных и при экспериментальной язве желудка, а также исследован его терапевтический эффект. Установлено, что данный физический фактор и сочетание его с пелоидотерапией показан в комплексном санаторно-курортном лечении больных язвенной болезнью, так как воздействует на ряд местных механизмов, участвующих в развитии язвообразования - нарушении ощелачивания в двенадцатиперстной кишке и изменении процессов репарации в гастродуоденальной зоне. Табл. 4. Библиогр.: 15 назв.

УДК 621.317+615.475

Инструментальные методы исследования биологических систем в миллиметровом диапазоне радиоволн / Искин В.Д. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 104-110.

Указываются наиболее перспективные области применения КВЧ излучения в сельском хозяйстве. Формулируются основные технические задачи, вытекающие из анализа существующего состояния проблемы и определяющие в своей совокупности актуальное научное направление. Предлагаются новые методы к проведению экспериментальных исследований, основанные на кратком библиографическом обзоре опубликованных автором работ. Ил.4. Библиогр.: 26 назв.

*
19

УДК 621.317+615.475

Исследование структуры излучения диэлектрического стержня в воде / Искин В.Д., Буткус Г.Т., Бутенко А.В., Медведовский А.В. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.науч. тр. - Киев: Наук.думка, 1989. - С. 111-123.

Рассматривается излучатель для исследования биологических систем. Излучатель представляет собой радиопрозрачный стержень прямоугольного сечения, погруженный в воду. Приведены зависимости амплитуды КВЧ поля от всех трех координат вблизи поверхности стержня, измеренные с помощью специального зонда. Показано, что покрытие поверхности излучателя тонким проводящим слоем позволяет регулировать продольный коэффициент затухания КВЧ поля и реализовать ряд новых экспериментальных методик, основанных на поиске корреляции между амплитудой электромагнитного поля и свойствами биологических систем. Ил.5. Библиогр.: 13 назв.

УДК 621.391

Влияние неровностей земных покровов на рассеяние и излучение радиоволн / Андреев Г.А., Гладышев Г.А. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 123-131.

При обработке и интерпретации получаемой с систем дистанционного зондирования информации существенным оказывается влияние неровностей земных покровов на их тепловое излучение и рассеяние излучения толщи атмосферы. В работе приведены количественные оценки этого влияния на основе использования плоского альбедо и интегрального коэффициента рассеяния теплового излучения толщи атмосферы. Получены соотношения, описывающие контрасты радиотеплового поля различных типов покровов. Результаты, представленные в работе, позволяют проводить оперативную обработку и интерпретацию данных агромониторинга в системах автоматизированного управления сельскохозяйственными комплексами. Ил.3. Библиогр.: 11 назв.

УДК 551.46.0:629.78

Определение температуры почв по дистанционным поляризационным измерениям теплового радиоизлучения / Андреев Г.А., Агратин С.Г., Гладышев Г.А., Станкевич О.К. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С. 132-138.

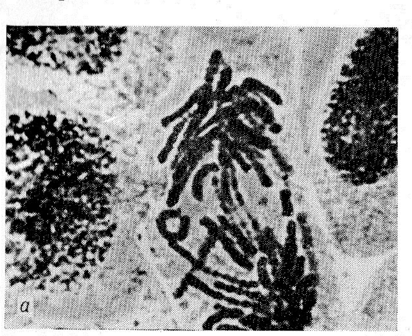
Описан метод определения температуры почв по дистанционным поляризационным измерениям теплового радиоизлучения. В радиодиапазоне из выражения для коэффициентов Френеля получается поляризационное соотношение для коэффициентов излучения, которое для гладких покровов при угле наблюдения 45° переходит в инвариант: $\Pi_{\mathscr{X}} = \Pi_{u} = 1$. Однако на практике необходимо учитывать неровности поверхности и подсвечивающее излучение толщи атмосферы. Полученные выражения для их учета дают возможность определения относительной погрешности измерений температуры. Ошибка в определении температуры при среднеквадратичном тангенсе угла наклона 0,2 составляет 8 %, максимальная погрешность при учете излучения толщи атмосферы - 16 К. Для отработки методики измерений был проведен эксперимент. Излучение покрова принималось радиометром на волне 8 мм. В результате измерений получена температура, отличная от реальной на 2,5 К, что удовлетворительно согласуется с теоретическими расчетами. Ил.4. Библиогр.: 8 назв.

УДК 551.596.08

Биофизический комплекс для определения объемной скорости потока и давления / Зверев В.В., Ермак Г.П., Россихин В.В., Алексеевский С.Д. // Исследования взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами: Сб.науч.тр. - Киев: Наук. думка, 1989. - С.138-142.

Описан биофизический комплекс для определения объемной скорости потока биологических жидкостей и давления в полых органах млекопитающих и человека. Ил.4.

К статье Н. Г. Шестопаловой, Л. Н. Головиной, А. А. Петрушина, В. К. Корнеенкова «Реакция клеток растений на действие радиоволн миллиметрового диапазона»



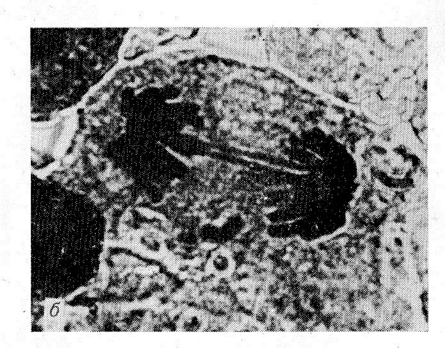


Рис. 2. Хромосомные аберрации в клетках лука

К статье В. Д. Искина «Инструментальные методы исследования биологических систем в миллиметровом диапазоне радиоволн»

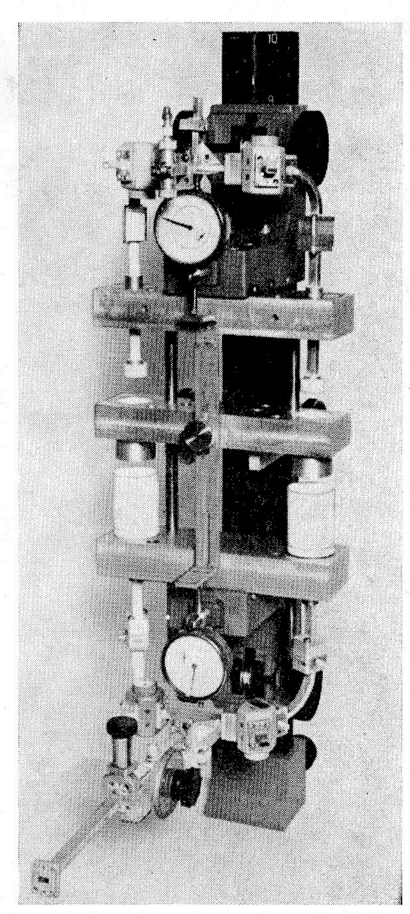


Рис. 1. Установка для измерения комплексной диэлектрической проницаемости разбавленных водных растворов

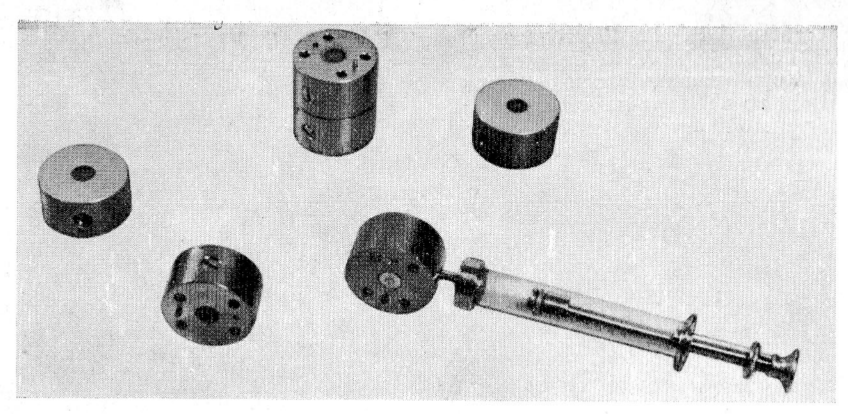


Рис. 2. Скин-кюветы для исследования жидких и порошковых материалов

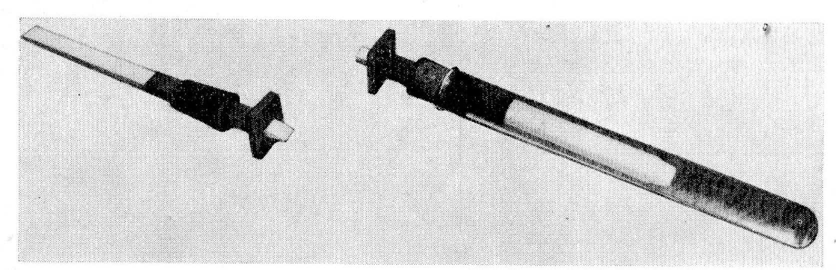


Рис. 3. Кюветы для микроволновой обработки культуры клеток

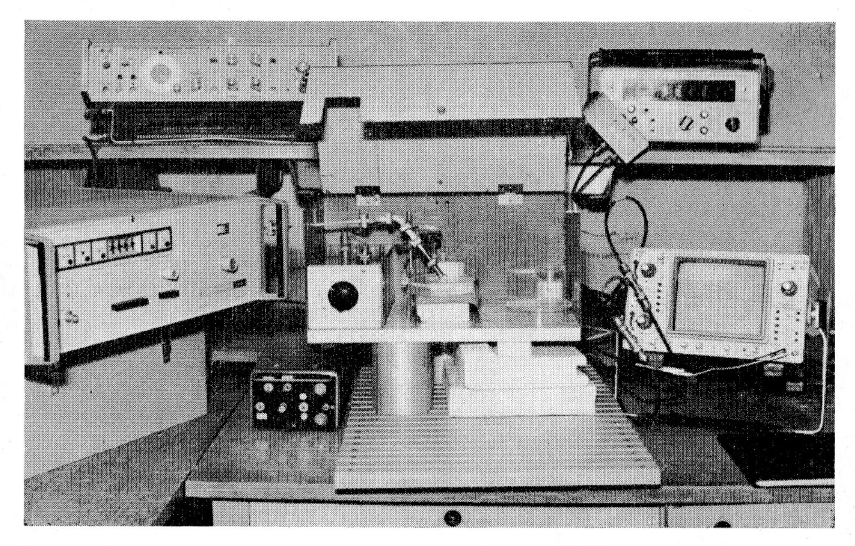
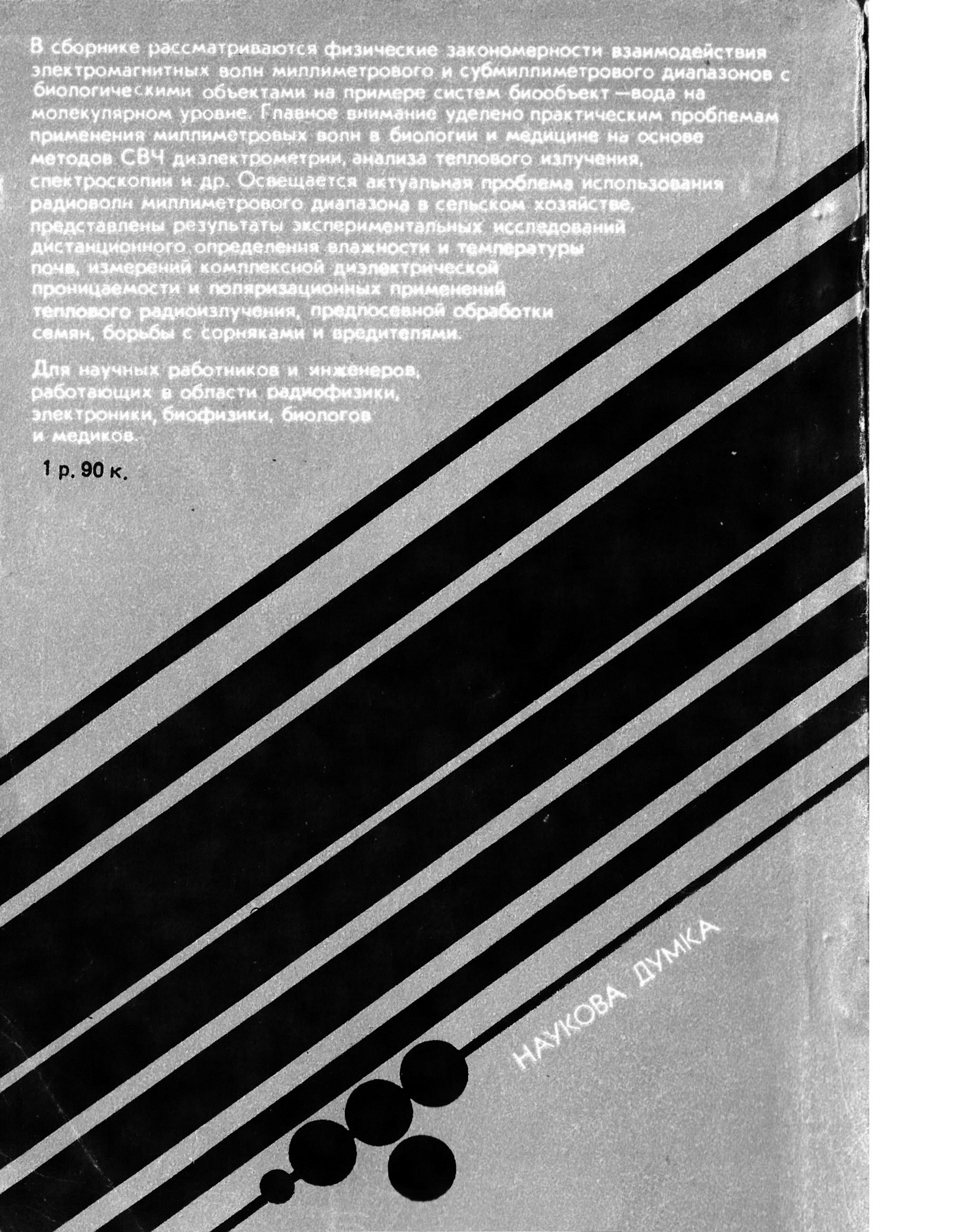


Рис. 4. Установка для исследования воздействия КВЧ излучения на биологические липидные мембраны


В сборнике рассматриваются физические закономерности взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с биологическими объектами на примере систем биообъект—вода на молекулярном уровне. Главное внимание уделено практическим проблемам применения миллиметровых волн в биологии и медицине на основе методов СВЧ диэлектрометрии, анализа теплового излучения, спектроскопии и др. Освещается актуальная проблема использования радиоволн миллиметрового диапазона в сельском хозяйстве, представлены результаты экспериментальных исследований дистанционного определения влажности и температуры почв, измерений комплексной диэлектрической проницаемости и поляризационных применений теплового радиоизлучения, предпосевной обработки семян, борьбы с сорняками и вредителями.
Для научных работников и инженеров, работающих в области радиофизики, электроники, биофизики, биологов и медиков.
1 р. 90 к.
НАУКОВА ДУМКА